Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

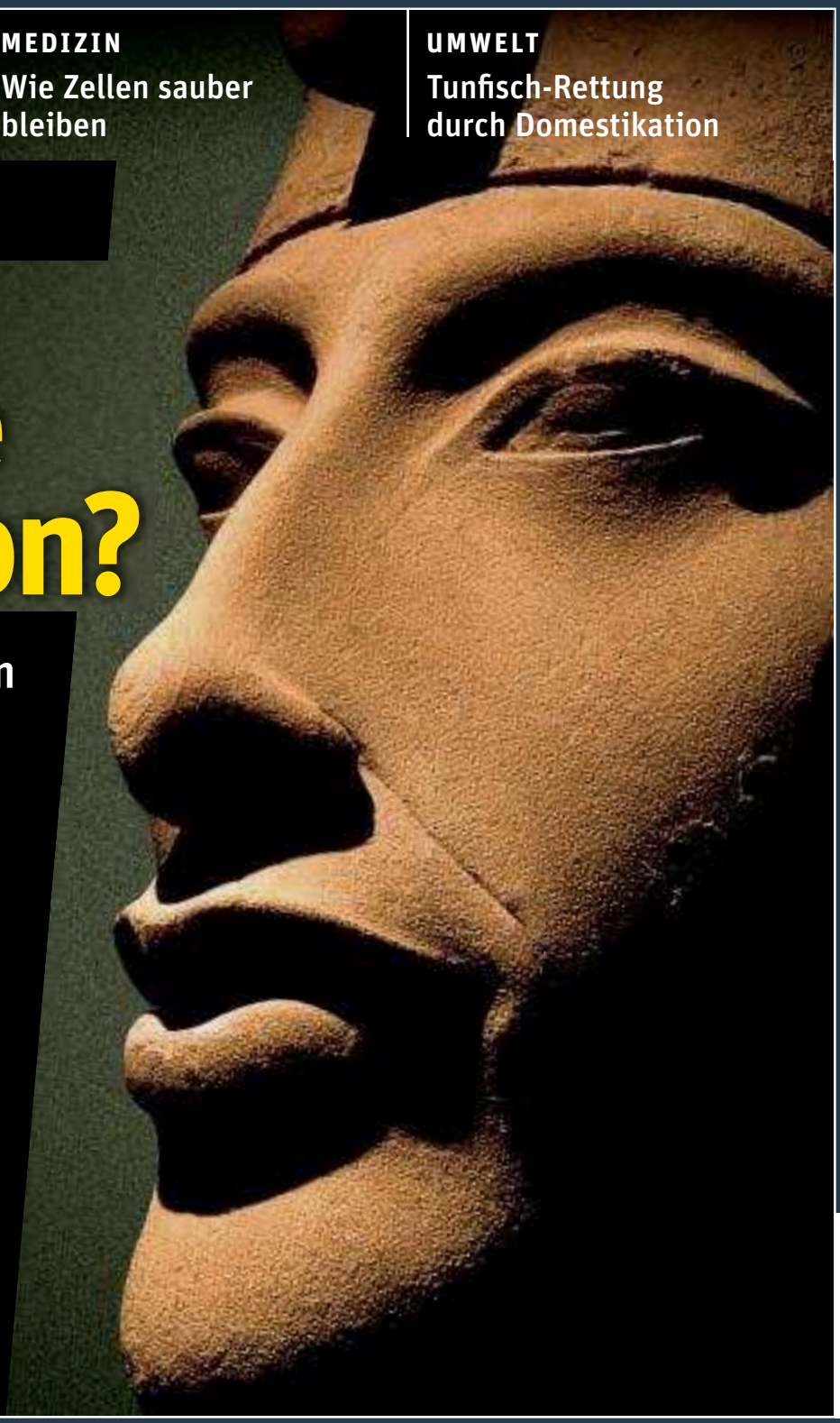
QUANTENPHYSIK
RÄTSELHAFTER SPIN DES PROTONS

Spektrum DER WISSENSCHAFT
DEZEMBER 2008 12/08

ASTRONOMIE
Superteleskop ALMA vor der Vollendung

MEDIZIN
Wie Zellen sauber bleiben

UMWELT
Tunfisch-Rettung durch Domestikation



Wann regierte Echnaton?

Forscher streiten um die Chronologie des alten Ägypten

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr.
D6179E

www.spektrum.de

Reinhard Breuer
Chefredakteur

König David und die Pharaonen

Meine Faszination für das alte Ägypten erwachte, als ich als Jugendlicher das Buch »Götter, Gräber und Gelehrte« las; sie ist bis heute ungebrochen. Dass nun ausgerechnet die Herrscherchronologie Anlass für Streit bietet, hätte ich nicht erwartet. Kontrovers diskutiert wird nämlich die Datierung altägyptischer Pharaonen sowie biblischer Regenten wie Salomon und David. Die Kontrahenten: der Ägyptologe Leo Depuydt als Vertreter der »Standardchronologie«, der Mainzer Bibelarchäologe Peter van der Veen und sein britischer Kollege Peter James als deren Kritiker und Vertreter einer alternativen Zeitreihe. Wir haben die Forscher eingeladen, uns ihre jeweilige Sicht der Dinge darzulegen.

Bei dem Zwist geht es nicht um eine wissenschaftsinterne Datenhuberei. Denn vor allem in Israel wird fast jeder archäologische Fund politisiert. Davon betroffen ist dann immer auch die historische Gültigkeit des Alten Testaments und daraus abgeleitet das Existenzrecht des modernen Israel (S. 78).

Eva Schinnerer ist eine ausgewiesene Expertin in Sachen Astronomie. In ihrem noch jungen Forscherleben hat sie sich leidenschaftlich mit Sternen, aktiven Galaxien und Staub beschäftigt. Nach dem Start in München und einigen Auslandsaufenthalten arbeitet sie inzwischen am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Längst ist sie maßgeblich an internationalen Astronomieprojekten beteiligt, so etwa am Cosmic Evolution Survey, der die Entwicklung von Galaxien und großen Schwarzen Löchern untersucht. Für uns schildert sie das neue Vorhaben mit dem Großteleskop ALMA, das gerade auf 5000 Meter Höhe in der chilenischen Atacama-Wüste gebaut wird und nächstes Jahr den Betrieb aufnehmen soll. Wissenschaftlich geht es auch dort um Schinnerers Lieblingsobjekte: Staub, Sterne und aktive Galaxien (S. 28).

In der dritten Folge unserer Serie über **die größten Probleme der Mathematik** widmet sich Wolfgang Blum, promovierter Mathematiker und Wissenschaftsjournalist, zwei berühmten Rätseln aus der Zahlentheorie: der Goldbach-Vermutung (»Ist jede gerade Zahl die Summe zweier Primzahlen?«) sowie der Frage nach der Anzahl von Primzahlzwillingen (dies sind benachbarte Primzahlen wie 3 und 5, 11 und 13 oder 29 und 31). Wie Blum bei seinen Recherchen erfuhr, können die Zahlentheoretiker für beide Probleme derzeit kaum größere Fortschritte vermelden. In einem solchen Fall halten Mathematiker es verstärkt mit der Numerik. So haben sie für beide Vermutungen die Beispiele inzwischen bis in schwindelnde Zahlenhöhen hochgerechnet – immer ein hübscher Test für den neuesten Supercomputer. Das beruhigt zwar die Nerven – ungeklärt sind die Rätsel aber dennoch (S. 94).

Unsere Wunschartikelrunde geht in die neunte Runde – wegen Ihrer regen Beteiligung führen wir den kleinen Wettbewerb weiter. Die fünf Themen stehen auf S. 7 zur Auswahl – machen Sie mit! Als Preis winkt wieder ein Wochenende für zwei in Heidelberg mit einem Besuch in unserer Redaktion.

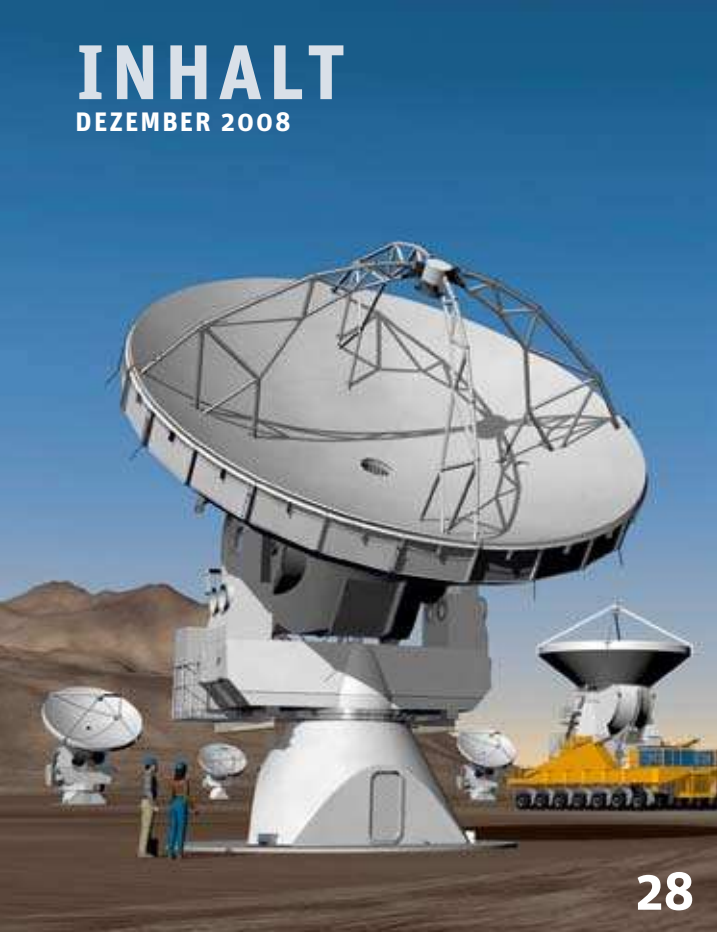
Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

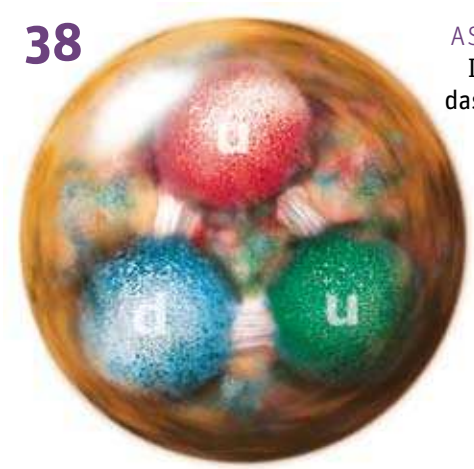
Die Heidelberger Astronomin Eva Schinnerer vor einem ihrer Arbeitsgeräte in Socorro/New Mexico

Vor Kurzem erschien unser Spektrum-Spezial **»Ist MATHEMATIK die Sprache der Natur?«**. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Technikmuseum Berlin haben wir einige Grundlagen unseres mathematischen Denkens zusammengestellt – ein spannendes Heft mit viel Stoff zum Nachdenken!

INHALT
DEZEMBER 2008



ASTRONOMIE & PHYSIK
Revolutionäres Radiointerferometer: ALMA



ASTRONOMIE & PHYSIK
Immer noch voller Rätsel: das Innenleben des Protons

MEDIZIN & BIOLOGIE
Auch Zellen brauchen Staubsauger

AKTUELL

10 Spektrogramm
Hartgesottene Raumfahrer · Kupferminen Salomons rehabilitiert · Warmherzig dank warmer Hände · Lustloses Essen macht dick · Röntgen mit Tesafilm u. a.

13 Bild des Monats
Süßer Kuss für heiße Biene

14 Nobelpreis für Chemie
Grünes Licht für Biologen

16 Nobelpreis für Physik
Symmetriebrüche in der Natur

18 Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften
Von Monopolisten und Ballungsräumen

19 Nobelpreis für Medizin
Sternstunden der Virologie

21 »Den Impfstoff hätte es schon Jahre früher geben können«
Interview mit Medizinnobelpreisträger Harald zur Hausen

26 Springers Einwürfe
Ufos machen sich immer rarer

ASTRONOMIE & PHYSIK

28 ▶ ALMAs tiefer Blick in kosmische Kreißsäle
Das neue Großteleskop in den chilenischen Anden verspricht detaillierte Erkenntnisse über die Entstehung von Galaxien, Sternen und Planeten

38 ▶ Die Suche nach dem fehlenden Spin
Wie Forscher eine der wichtigsten Eigenschaften des Protons, den Spin, aus den Vorgängen in seinem Inneren erklären wollen

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

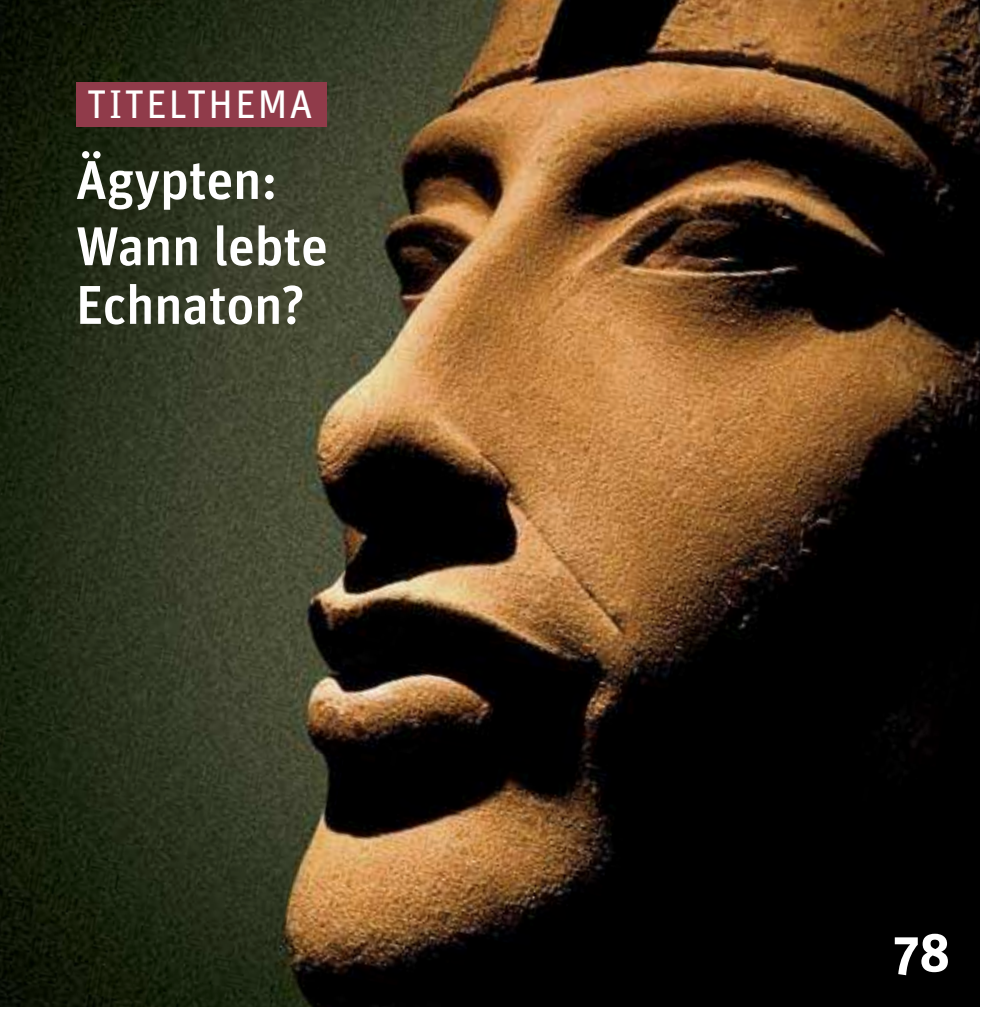
46 Woran merkt man, dass die Erde sich dreht?
Angeblich an der Corioliskraft; aber im richtigen, mit dem Fixsternhimmel verbundenen Bezugssystem stellen sich deren Effekte viel einfacher dar

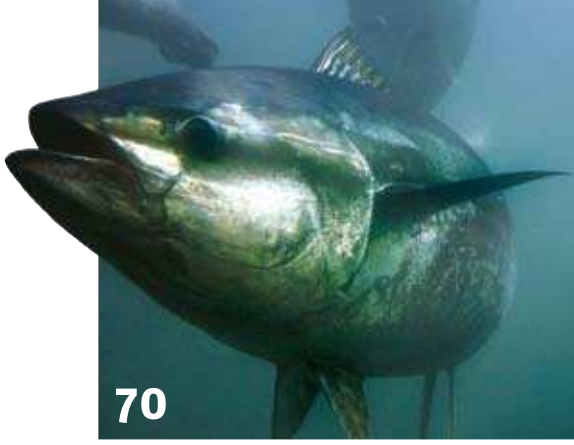
MEDIZIN & BIOLOGIE

58 ▶ Reinemachen in der Zelle
Gepflegt und in gutem Betriebszustand – das ist auch das Gütesiegel einer gesunden Zelle. Mangelhaftes Aufräumen scheint zum Altern und zu verschiedenen Krankeiten beizutragen

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial: König David und die Pharaonen
8 Leserbriefe
9 Impressum
105 Im Rückblick
106 Rezensionen:
Jean-Baptiste de Panafieu, Patrick Gries *Evolution*
George G. Szpiro *Das Poincaré-Abenteuer*
Philip Zimbardo *Der Luzifer-Effekt*
Susan Blackmore *Gespräche über Bewußtsein*
Joachim Hecker *Das Haus der kleinen Forscher*
114 Vorschau





ERDE & UMWELT
Rettungsmaßnahmen für Tunfische

TECHNIK & COMPUTER
Keine heile Welt im Web 7.0

ERDE & UMWELT

70 ▶ Tunfische – Rettung in letzter Minute?
Die Weltbestände der großen Tunfische sind längst völlig überfischt. Vor allem die Nachfrage nach Delikatessen wie Sushi macht dem König der Meere den Garaus. Wahrscheinlich können ihn nur noch Fischfarmen retten

MENSCH & GEIST

TITEL

78 Wann regierte Echnaton?
Forscher streiten über die Zeitenfolge der Herrscher im alten Ägypten

88 Geschichtsbild in Scherben 🔊
Aus der Chronologie Ägyptens folgt auch die des Heiligen Landes. Nun fordern Bibelarchäologen eine Korrektur mit weit reichenden Folgen

SERIE (TEIL III)
DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

94 ▶ Goldbachs Vermutung und die Primzahlzwillinge
Einfache Sätze über Primzahlen verweigern sich seit Jahrhunderten hartnäckig dem Beweis. Doch kommt man der Lösung dieser Rätsel mit neuen theoretischen Mitteln und Computerhilfe zumindest näher

TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

100 Wann ist ein »a« ein »a«?
Mit Fourieranalyse und elektronischen Schaltkreisen finden Musiker den richtigen Ton

102 Virtuelle Gartenzwerge im Web 7.0
Eine schöne neue Welt sieht Gunter Dueck für die Zukunft des Internets vorher. Dass wir damit nur Spaß haben werden, bezweifelt allerdings auch der Informatiker

Titelmotiv: AKG Berlin

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter:
www.spektrum.de/audio

ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf **www.spektrum.de**. Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

NL SHOP / FOTOLIA

TONY TRAVOUILLON, CALTECH

FÜR ABONNENTEN »Spotlight auf die unteren Ränge«
www.spektrum-plus.de

INTERAKTIV Nah dran am Wandel
www.wissenslogs.de/wblogs/blog/klimalounge

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Nobelpreise online!

Doppelt hält besser: Neben den Artikeln über die Nobelpreisträger 2008, die wir in dieser gedruckten »Spektrum«-Ausgabe vorstellen, finden Sie im Internet zusätzliche Berichte von **spektrumdirekt** – in einer Sonderausgabe, die Sie als PDF-Datei mit nur einem Klick herunterladen können
www.spektrumdirekt.de/artikel/971754

Schleier des Vergessens

Die Diagnose Alzheimerdemenz hat nichts von ihrem Schrecken verloren. Doch Forscher lüften immer mehr Geheimnisse dieser schleichenden und bislang unheilbaren Krankheit. Alle **spektrumdirekt**-Artikel zum Thema finden Sie unter
www.spektrumdirekt.de/alzheimer

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

»Spotlight auf die unteren Ränge«

Chefetagen üben eine schier grenzenlose Faszination auf Wirtschaftspsychologen aus. Deshalb zählt »Leadership« zu deren beliebtesten Studienobjekten. Doch neuerdings erkunden Forscher verstärkt die Psyche der »Geführten«

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER
www.spektrum-plus.de

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

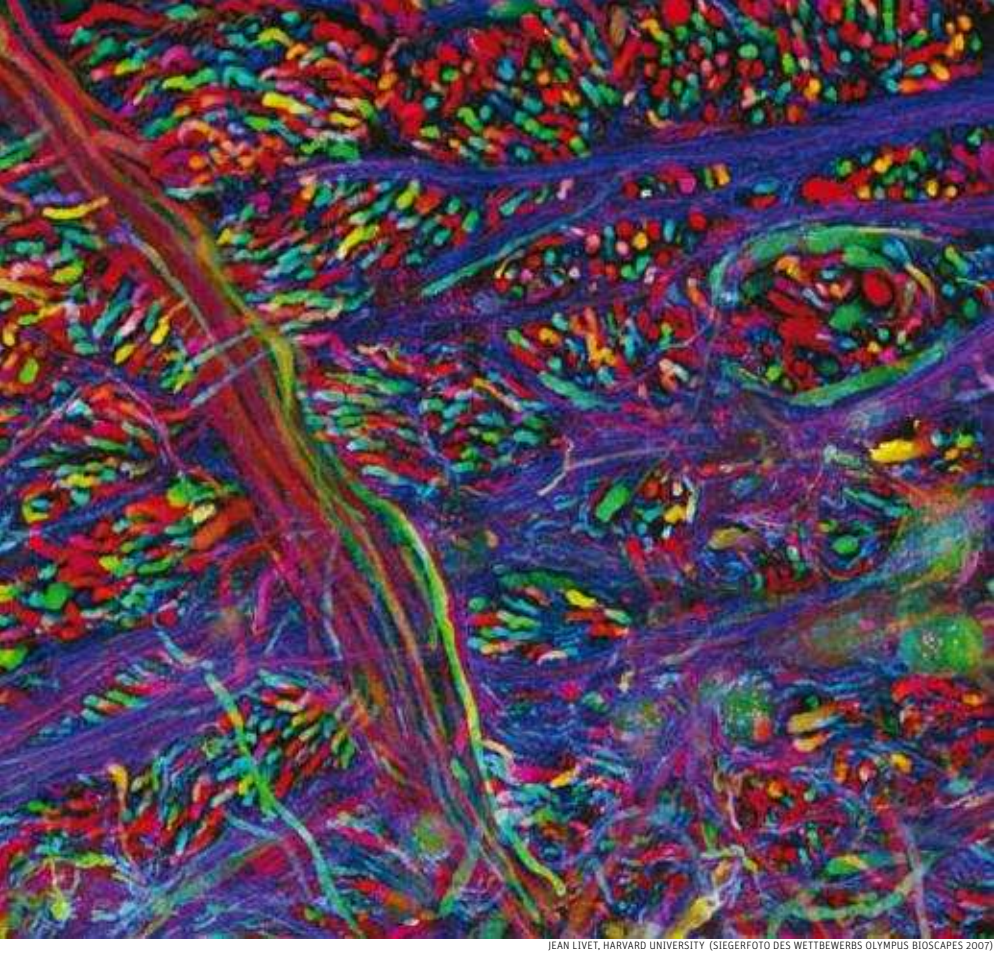
Gewinnen bei der Mathe-Knobelei

Gerd Baron und Richard F. Mischak machen es Ihnen nicht leicht. Unter Titeln wie »Gepumptes Finanzdoping«, »Verflixt und zugefaltet« und die »Suche nach dem heiligen Integral« stellen sie Monat für Monat mathematische Aufgaben vor, die es in sich haben. Knobeln Sie mit – und gewinnen Sie unseren Buchpreis
www.spektrumdirekt.de/knobelei

Nah dran am Wandel

WISSENSlogs

Namhafte Klimaforscher werfen in ihren Beiträgen für den Blog »KlimaLounge« einen Blick hinter die Kulissen des Weltklimarats, bringen Klarheit in hitzige Debatten über die Ursachen des Klimawandels und kritisieren irreführende Umfragen. Reden Sie mit auf
www.wissenslogs.de/wblogs/blog/klimalounge



JEAN LIVET, HARVARD UNIVERSITY (SIEGERFOTO DES WETTBEWERBS OLYMPUS BIOSCAPES 2007)

TIPPS **Dicht dran am Leben**

www.spektrum.de/artikel/972594

FREIGESCHALTET

»Feuerball mit Ansage«

www.astronomie-heute.de/artikel/972088

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.com
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Dicht dran am Leben

Beim internationalen Wettbewerb Olympus BioScapes, der lichtmikroskopische Fotografien aus den Lebenswissenschaften auszeichnet, wurden die Gewinner des Jahres 2008 gekürt. Wir stellen sie vor unter

www.spektrum.de/artikel/972594

Lösen Gene archäologische Rätsel?

Dirk Husemann erklärt seinen Lesern zwar, wie die moderne Genetik archäologische Mysterien enthüllt. Doch sein Buch »Vaterschaftstest für Pharao« beinhaltet auch viel Unsinn. Lesen Sie die Rezension von **spektrumdirekt**-Redakteur Andreas Jahn oder diskutieren Sie mit über Husemanns Werk

www.spektrumdirekt.de/artikel/971500

FREIGESCHALTET

*Ausgewählte Artikel aus **Sterne und Weltraum** und **Gehirn&Geist** kostenlos online lesen*

»Schule fürs Leben«

Schüler könnten besser lernen, müssten sie nicht ständig Dinge tun, die sie als sinnlos erleben. Darum will die Thüringer Bildungsinitiative »Nelecom« dem Lernstoff mehr Bedeutung geben – und lässt sich dabei vom Neurobiologen Gerald Hüther unterstützen

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

www.gehirn-und-geist.de/artikel/972390

»Feuerball mit Ansage«

Erstmals ist es gelungen, den Absturz eines Asteroiden vorherzusagen. Das Geschoss war zum Glück nur wenige Meter groß

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

www.astronomie-heute.de/artikel/972088

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Kontroversen online

Wird Bioenergie zum Albtraum, der Klimawandel von Skeptikern zerredet, die Finanzwelt von verantwortungslosen Gesellen beherrscht? Diskutieren Sie mit Wissenschaftlern, Journalisten und Lesern auf den wissenslogs! Oder Sie lassen sich schlicht informieren: Claudia Kaiser hat jüngst die »Nanowochen« ausgerufen, und Physikprofessor Metin Tolan analysiert den überraschenden Bundesligaerfolg der TSG 1899 Hoffenheim mit statistischen Mitteln. Wem das alles nicht reicht: Nur einen Klick weiter finden Sie Blogs zu Geschichte, Hirnforschung und Astronomie

www.wissenslogs.de
www.scilogs.de

SIAMAK SABET

Leuchtende Nachtwolken sind beeindruckende optische Phänomene (links: Fälschung; rechts: Original).

PER-MAGNUS HEDÉN

Original und Fälschung

Wolken, die bei Nacht leuchten
Bild des Monats, September 2008

Wir haben uns gefreut, in Ihrer Septemberausgabe als »Bild des Monats« eine leuchtende Nachtwolke zu sehen. Unser Institut beschäftigt sich seit seiner Gründung (1992) mit der wissenschaftlichen Erforschung dieses Phänomens. Leider mussten wir feststellen, dass das abgebildete Foto eine Fälschung ist: Die Wolken stammen in Wahrheit aus einer Aufnahme in Südschweden.

Auch in dem Bild selbst gibt es Hinweise auf eine Fälschung. Zum Beispiel sind Wasserwellen bei den langen Belichtungszeiten, die zur Aufnahme solcher Wolken erforderlich sind, praktisch nicht erkennbar.

Immer wieder wird suggeriert, dass sich nachtleuchtende Wolken in den letzten Jahren weiter nach Süden ausgebreitet hätten, so auch in der Originalquelle Ihres Fotos. Tatsächlich gibt es dafür keinerlei wissenschaftlich fundierte Indizien. Aus unseren Messungen lässt sich auch keine systematische Zunahme der Häufigkeit solcher Wolken ableiten, wie in Ihrer Bildunterschrift angedeutet wird. Wir wissen noch zu wenig über die natürlichen Variabilitäten der leuchtenden Nachtwolken, um anthropogene Einflüsse herausfiltern zu können.

Prof. Franz-Josef Lübken,
Dr. Gerd Baumgarten, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Naturschutz nur mit den Menschen

Mensch und Natur – keine Gegner!
September 2008

Mit der Forderung »Was war, darf bleiben« macht es sich Herr Bruns zu einfach. Auch im Naturschutz werden sicher Fehler gemacht, aber diese lassen sich nur durch wissenschaftliche Forschung beheben. Ein gutes Beispiel dafür ist das Salzwiesen-Monitoring-Projekt des WWF auf Hallig Langeneß, das im Lauf von zwei Jahrzehnten den Einfluss von Rinderbeweidung auf die Salzwiese untersucht. (Kurz gefasstes Ergebnis: Extensive (!) Beweidung fördert die Artenvielfalt.) Durch das Monitoring haben die Fachbehörden jetzt Daten als Entscheidungsgrundlage an der Hand, während ansonsten leider überwiegend Glaubenskriege mit unterschiedlichem Ausgang geführt wurden.

Ich war vor knapp 30 Jahren als Zivildienstleistender der Naturschutzgesellschaft Schutzstation Wattenmeer auf Hallig Langeneß tätig. Schon damals war unsere Überzeugung, dass man Naturschutz nur mit den Menschen und nicht gegen sie machen kann – und dort, wo eine langfristige offene Zusammenarbeit stattgefunden hat, sprechen die Ergebnisse für sich. Nicht umsonst begrüßt die überwiegende Mehrheit der Hallig-Bevölkerung mittlerweile nicht nur den Nationalpark, sondern hat sich auch für den Beitritt zum Biosphärenreservat entschieden!

In Dithmarschen und auf Eiderstedt ist die Stimmungslage zwar teilweise anders, aber dort hat auch der jahrzehntelange Dialog zwischen Bevölkerung und Naturschutz nie wirklich stattgefunden.

Gerhard Pahl, Winsen

Die Formel für zeta(s)

»Wer die Zetafunktion kennt, kennt die Welt!«, September 2008

Auf S. 90 wird festgestellt, dass Nullstellen von zeta für $s = -2, -4, -6 \ldots$ vorliegen.

Das darf man dann aber nicht in die Formel für zeta auf S. 88, 1. Spalte einsetzen. Zum Beispiel ergibt sich für $s = -2$ dann $\text{zeta}(-2) = 1 + 4 + 9 + 16 + \ldots$. Das ist mit Sicherheit nicht null.

Prof. Eberhard Weber, Halle

Antwort der Redaktion:
Das ist richtig und gilt für alle Werte s, deren Realteil kleiner als 1 ist: Setzt man s in die ursprüngliche Definition von zeta

(auf S. 88) ein, so ist das Ergebnis unendlich. Beschränkt man sich auf diese Definition, so ist die Zetafunktion für $\mathrm{Re}(s) < 1$ nicht definiert.

Man kann den Geltungsbereich der Funktion über seine ursprüngliche Ausdehnung hinaus in das »verbotene Gebiet« hinein erweitern. Die Erweiterung heißt »analytische Fortsetzung« und ist – jedenfalls in unserem Fall – eindeutig und frei von Willkür. Es gibt nur diese eine »natürliche« Art, die Zetafunktion fortzusetzen.

Von dieser Erweiterung handelt der ganze Rest des Artikels. Insbesondere liegen die berühmten nichttrivialen Nullstellen der Zetafunktion sämtlich in dem Bereich, der durch die ursprüngliche Definition nicht abgedeckt ist.

Knochen des Neandertalers

Was macht(e) den Menschen zum Menschen?, November 2008

In Ihrer sehr gelungenen aktuellen Ausgabe ergibt sich auf S. 67 ein Missverständnis. Der rechts dargestellte Knochen ist keineswegs ein Oberarm-, wie im Text vermerkt, sondern vielmehr ein linker Oberschenkelknochen. (*Anm. der Red.*: Der Leser Prof. Gerd Novotny weist noch darauf hin, dass der Oberschenkelknochen mit dem oberen Ende nach unten abgebildet ist.) Ansonsten ist der Artikel schön zu lesen.

Andreas Scholten, Köln

30 Jahre Spektrum

Ein Auge in die Vergangenheit

Glückwunsch! Die Sonderausgabe aus Anlass des 30. Geburtstags war einfach zauberhaft. Alle Themen waren hochinteressant und ich habe ein ganzes Wochenende darin geschmökert.

Weiter so, auch mit den mathematischen Themen in den letzten Heften, die waren spannender als jeder Krimi!

Dr. Joachim Werner, Petershausen

Einblicke in verschiedene Forschungsgebiete

Vielen Dank für das überaus spannende Jubiläumsheft von »Spektrum der Wissenschaft«!

Und ebenso für das Beiheft, das so manchem Namen, den man aus »SdW« oder »wissenschaft-online« kennt, ein Gesicht gibt.

Danke auch für die Zusammenstellung der wichtigsten Artikel aus drei Jahrzehnten. Ich werde sie mir nach und nach alle noch einmal vornehmen, denn abgesehen von drei Heften besitze ich noch alle, die Erst-Edition, das Novemberheft von 1978 und das Abonnement seit Februar 1979.

Die Spektrumhefte waren für mich bis zu meiner Pensionierung (als Lehrerin) im Jahr 2002 ein wichtiger Stein im Oberstufen-Biologieunterricht. Schon gleich im ersten Artikel in der Erst-Edition fand sich eine eindrucksvolle Grafik zum Kohlendioxid-Problem, die sich bestens für ein Klausurthema eignete. Und so mancher Schüler hat sich aus (von mir vorgeschlagenen) Spektrumartikeln ein Referatthema herausgesucht.

Aber auch heute bedeutet mir »Spektrum« noch viel: Die Einblicke in verschiedene Forschungsgebiete, ob Medizin, Teilchen- und Astrophysik, Geologie, Archäologie, auch mal ein Sprachenstammbaum und vieles mehr faszinieren mich. Ich hoffe, dass ich noch so manches Heft erleben darf.

Helmi Gnauk, Seelze

Der Weg als Ziel

In einer westlichen Welt, die immer mehr von Unterhaltungs- und Zerstreuungswahn gekennzeichnet ist, und wo der Job leider zu oft als notwendiges Übel (Mittel zum Geld) betrachtet wird, ist es erfrischend und motivierend, von Menschen zu hören, die ihre Arbeit sehr mögen, ja sogar hoch loben.

Danke im Namen aller Wissenschaftslaien, die trotz allem mit Zuversicht in die Zukunft blicken und die gelernt haben, wie wichtig es ist, sich mit seiner Arbeit zu identifizieren und »den Weg als Ziel« zu erkennen.

Weiter so und viel, viel Erfolg.

Carlos Giani, Klosterneuburg bei Wien

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Ursula Loos, Dr. Frank Schubert, Friedrun van der Veen.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Goethestraße 85, 10623 Berlin, Tel. 030 526821-841, Fax 030 7526821-828; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01. 01. 2008.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2008 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

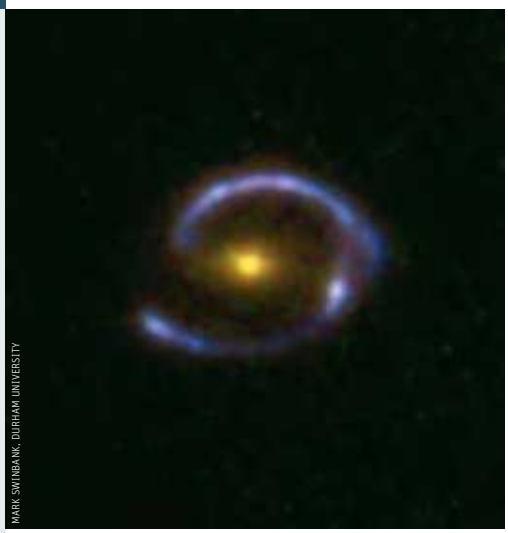
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President: Frances Newburg, Vice President: Mike Florek, Circulation Director: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel



MARK SWINBANK, DURHAM UNIVERSITY

Das »kosmische Auge« besteht aus einer nahen Galaxie im Zentrum, die als Gravitationslinse wirkt, und einem blauen Ring, bei dem es sich um das vergrößerte Abbild eines fernen Milchstraßensystems handelt.

ASTROPHYSIK

Ein Auge in die Vergangenheit

■ Für den tiefen Blick ins Weltall nutzen Astronomen gerne so genannte Gravitationslinsen. Diese stehen immer dann zur Verfügung, wenn zwischen einem weit entfernten Objekt und der Erde eine große Galaxie liegt, die im Idealfall den Raum so krümmt, dass das Licht aus der Ferne gebündelt und verstärkt wird. Dank einer solchen Anordnung konnten Dan Stark vom California Institute of Technology in Pasadena und Kollegen aus Durham und Cardiff jetzt ungewöhnlich weit in den Kosmos spähen. In achtfacher Vergrößerung entdeckten sie eine Galaxie, die elf Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt und damit nur knapp drei Milliarden Jahre nach dem Urknall entstanden ist. Das erlaubte bisher ungeahnte Einblicke in die Entwicklung der frühesten Milchstraßensysteme.

Wegen des starken Linseneffekts konnten Stark und Kollegen die Materieverteilung und das Geschwindigkeitsfeld der fernen Galaxie erkennen. Dabei wurde ersichtlich, wie das gesamte System sich zu drehen beginnt und Spiralarme entwickelt. Es gehört nicht viel Fantasie dazu, sich vorzustellen, wie daraus im Lauf der Jahrmilliarden ein Gebilde hervorgeht, das aussieht wie unsere Milchstraße.

Die Gravitationslinse im Vordergrund ist nur 2,2 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt. Das Licht der dahinterliegenden Galaxie umrahmt sie auf Grund der geometrischen Verhältnisse in Form eines fast perfekten Rings. Deswegen erscheinen uns beide gemeinsam wie ein großes Auge – was dem Objekt den Namen »Cosmic Eye« eintrug. *Nature, Bd. 455, S. 775*

MEDIZIN

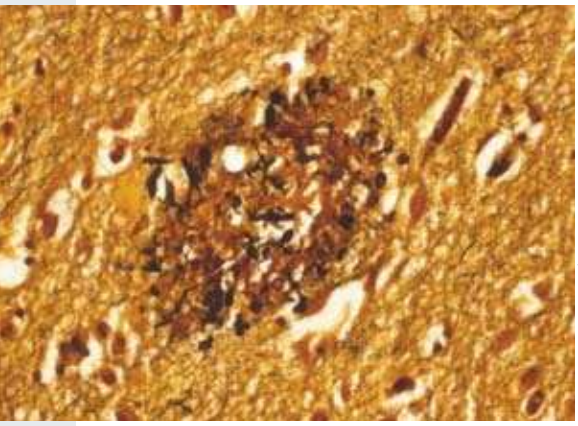
Antiepileptikum gegen Alzheimer

■ Eine Demenz beginnt mit der Verschlechterung des Kurzzeitgedächtnisses und kann bis zum Verlust aller Erinnerungen fortschreiten. 24 Millionen Menschen weltweit leiden darunter, und zwei Drittel von ihnen sind an der tückischsten Form erkrankt: dem neurodegenerativen Morbus Alzheimer. Schon Jahre vor dem Auftreten erster Symptome bilden sich in den Gehirnen der Betroffenen so genannte Plaques: Klumpen aus fehlerhaft gefalteten Amyloid-Beta-Peptiden, die ab einer gewissen Konzentration Nervenzellen absterben lassen. Der zerstörerische Prozess lässt sich bislang weder verhindern noch aufhalten oder gar rückgängig machen.

Insofern klingt eine Entdeckung, die Weihong Song von der University of British Columbia in Vancouver und seinen Kollegen gelungen ist, geradezu spektakulär. Die Forscher fanden heraus, dass das Antiepileptikum Valproinsäure (VAP) ein überraschend wirksames Mittel gegen die Plaques darstellt. Sowohl in Zellkulturen als auch bei Mäusen, die infolge einer Genmanipulation die Alzheimerkrankheit entwickeln, blockierte es eine Kaskade von Enzymreaktionen, an deren Ende die Ansammlung der bedrohlichen Amyloid-Beta-Peptide stand. Die Säure verhinderte dadurch nicht nur den Tod weiterer Maushirnzellen – beschädigte Neurone begannen überdies, sich zu regenerieren. Nach einiger Zeit schnitten die Mäuse in Erinnerungstests wieder deutlich besser ab.

Allerdings scheint VPA nur im Frühstadium der Krankheit wirksam. Bei fortgeschrittener Demenz verbesserte es die Symptome im Tierversuch nicht mehr wesentlich. Studien mit menschlichen Probanden haben bereits begonnen.

Journal of Experimental Medicine, Online-Vorabpublikation



NATIONAL INSTITUTE ON AGEING / NIH

Plaque aus verklumptem Beta-Amyloid im Gehirn eines verstorbenen Alzheimer-Patienten

PSYCHOLOGIE

Warmherzig dank warmer Hände

■ Wenn wir »warmherzig« sagen, meinen wir so etwas wie »freundlich« oder »hilfsbereit«. Dass in unserer Sprache dafür nicht nur zufällig ein Temperaturbegriff auftaucht, haben Lawrence E. Williams von der University of Colorado in Boulder und John A. Bargh von der Yale University in New Haven (Connecticut) jetzt anhand zweier Experimente nachgewiesen.

Während der Aufnahme persönlicher Daten wurden 41 Probanden gebeten, kurz einen Becher mit kaltem oder warmem Kaffee für den Versuchsleiter zu halten. Im Anschluss sollten sie einer schriftlich beschriebenen, fiktiven Person zehn Charaktermerkmale wie »aufmerksam« oder »hektisch« zuordnen. Dabei zeigte sich, dass diejenigen Teilnehmer, die zuvor eine warme Tasse gehalten hatten, dem fremden Individuum deutlich mehr Wärme bescheinigten als solche, deren Tasse kalt gewesen war.

In einer zweiten Studie sollten 53 Teilnehmer vorgeblich einen Wärme- oder Kühlbeutel testen. Im Anschluss durften sie als Dank ein Geschenk für sich selbst oder einen Freund aussuchen. Nur ein Viertel der Probanden, die ein Kühlpad erprobt hatten, wählte ein Präsent für jemand an-

BIOLOGIE

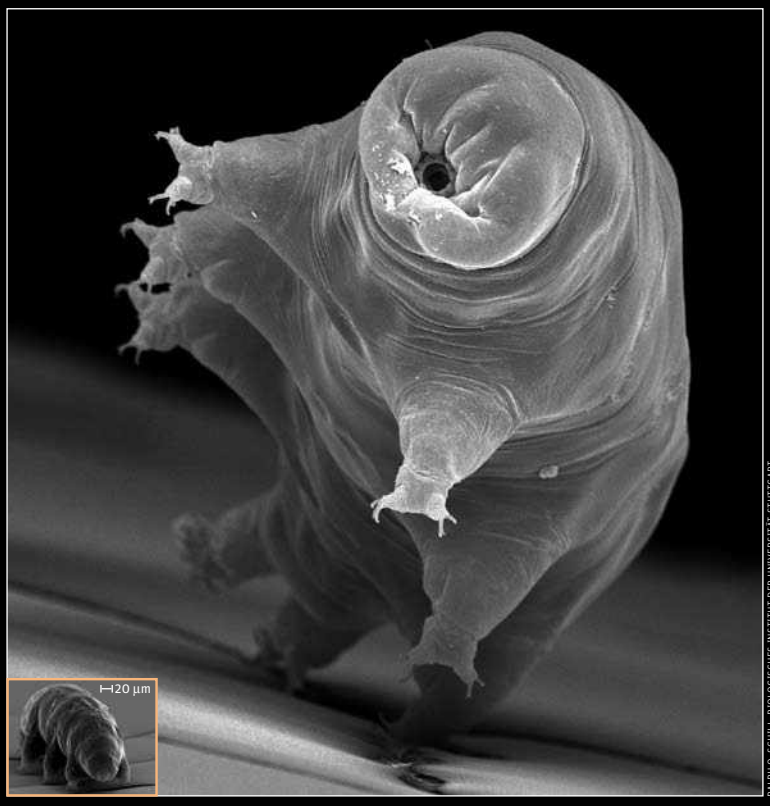
Hartgesottene Raumfahrer

Die etwa einen Millimeter großen, achtbeinigen Bärtierchen gelten als sehr strapazierfähig. So können sie, wenn ihr Lebensraum austrocknet, jahrelang in einem todesähnlichen Zustand überdauern. Deshalb wollten Forscher um Ingemar Jönsson von der Universität Kristianstad (Schweden) kürzlich wissen, ob die Überlebenskünstler auch Weltraumbedingungen verkraften. Dazu ließen sie im September 2007 zwei Spezies zehn Tage lang mit der unbemannten russischen Raumkapsel FOTON-M3 in 270 Kilometer Höhe um die Erde kreisen. In getrockneter Form wurden die Tierchen dort dem Vakuum und der Kälte des Weltalls ausgesetzt – und überlebten fast alle.

Erst als die Forscher auch noch die hochenergetische UV-Strahlung der Sonne ungefiltert auf sie einwirken ließen, war für die meisten Bärtierchen die Grenze ihrer Belastbarkeit erreicht. Einige wenige Exemplare von *Milnesium tardigradum* aber überstanden selbst diese Tortur. Zurück auf der Erde waren sie nach einem Wasserbad wieder quicklebendig und fortpflanzungsfähig.

Diese Resistenz ist höchst erstaunlich. Schließlich weiß man, dass UV-Licht Zellgewebe und das genetische Material zerstört und Mikroorganismen abtötet. Bislang war auch kein Tier bekannt, das Weltraumbedingungen unbeschadet übersteht. Jönsson und seine Kollegen spekulieren, dass ein bislang unbekannter Zellreparaturmechanismus für die Unverwüstlichkeit der Bärtierchen verantwortlich sein könnte.

Current Biology, Bd. 18, R729



RALPH O. SCHILL, BIOLOGISCHES INSTITUT DER UNIVERSITÄT STUTTGART

Bärtierchen trotzten bei einem Raumflug dem Vakuum und der Kälte des Alls. Einige überstanden selbst die UV-Strahlung.

deren, bei den Testern des Wärmekissens war es hingegen mehr als die Hälfte.

Das Ergebnis passt zu Gehirnuntersuchungen, wonach die Inselrinde im Kortex sowohl für Temperaturempfindung als auch für soziale Emotionen zuständig ist. Kindheitserlebnisse von warmer Körpernähe seien daher unter anderem wichtig für die Entwicklung von Empathie, so die Forscher.

Science, Bd. 322, S. 606

PINAR ISTEK, UCSD

ARCHÄOLOGIE

Kupferminen Salomons rehabilitiert

Laut Bibel gewann König Salomon Kupfer aus Bergwerken in Edom im Süden des heutigen Staates Jordanien. Als in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts im Faynan-Distrikt 50 Kilometer südlich des Toten Meers alte Kupferminen und Verhüttungsanlagen entdeckt wurden, schrieben die Archäologen sie deshalb ganz selbstverständlich dem Herrscher der Israeliten zu, der etwa 965 bis 926 v. Chr. regierte. Später jedoch legten Funde an anderen Stellen Südjordaniens nahe, dass die Kupferverhüttung in diesem Gebiet erst ab dem 7. Jahrhundert v. Chr. begann. Das nährte auch Zweifel an der biblischen Aussage.

In dieser virtuellen Rekonstruktion einer ehemaligen Kupferhütte in Südjordanien zeigen die gelben und blauen Punkte Stellen, die auf das 9. beziehungsweise 10. vorchristliche Jahrhundert datiert wurden.

Nun konnten Thomas E. Levy von der University of California in San Diego und seine Kollegen den alttestamentarischen Bericht rehabilitieren. In der zehn Hektar großen Ausgrabungsstätte bei Khirbat en-Nahas im Faynan-Distrikt untersuchten sie unter mehr als hundert Gebäuden eines, das zuvor schon als Kupferschmelze identifiziert worden war. Aus bis zu sechs Meter Tiefe gewannen sie bei Grabungen organisches Material wie Wurzeln und verkohlte Holzreste, die sie in Labors in Heidelberg, Oxford und Groningen mit Hilfe der Radiokarbonmethode datieren ließen.

Die Altersbestimmung ergab Werte zwischen 1058 und 920 v. Chr., was in die Regierungszeit Salomons fällt. Ob die Kupferminen wirklich dem reichen biblischen Herrscher unterstanden, bleibt allerdings offen.

PNAS, Online-Vorabpublikation

EVOLUTION

Flexible Falter

MARIE NYDAM, CORNELL UNIVERSITY

Grammia virgo **aus der Familie der Bärenspinner signalisiert mit einer auffälligen Farbzeichnung Vögeln seine Giftigkeit. Fledermäuse warnt der Schmetterling mit Ultraschallsignalen.**

■ Bärenspinner produzieren Stoffe, die ihren Fressfeinden den Appetit verderben, ja teils sogar giftig sind. Diesen Umstand müssen sie potenziellen Angreifern allerdings kundtun – und zwar möglichst nicht erst auf deren Zunge. Wie John M. Ratcliffe von der süddänischen Universität in Odense und Marie Nydam von der Cornell University in Ithaca (New York) nun herausgefunden haben, handhaben die Falter diese als Aposematismus bekannte Abwehrstrategie mit ungewöhnlicher Finesse.

Die beiden Forscher untersuchten 26 Bärenspinnerspezies in Kanada. Dabei beobachteten sie, dass die verschiedenen Arten nicht nur über mehrere Methoden verfügen, ihre Ungenießbarkeit zu signalisieren, sondern sie auch je nach vorherrschendem Fressfeind flexibel einsetzen.

Insekten fressende Vögel jagen am Tag und sind über die gesamte Sommersaison aktiv. Daher warnen die tagaktiven Schmetterlinge mit einer besonders auffälligen Färbung vor ihrem Genuss. Die Nachtfalter entziehen sich dieser Bedrohung, indem sie das Tageslicht scheuen, und können sich deshalb ein schlichtes Outfit leisten.

Im Spätsommer gehen allerdings vermehrt auch Fledermäuse auf die Jagd. Deshalb verwenden jene Bärenspinner, die um diese Jahreszeit fliegen, bevorzugt Ultraschallsignale, um sich den nachtaktiven Jägern als schlecht schmeckende Beute zu erkennen zu geben: Ein buntes Farbkleid wäre an die fast blinden Fledermäuse verschwendet. Tagaktive Falter wiederum verzichten auf die akustische Warnung.

Nature, Bd. 455, S. 96

ERNÄHRUNG

Lustloses Essen macht dick

■ Eigentlich sollte man meinen, dass eine zu große Esslust die Ursache von Fettsucht ist. Doch offenbar trifft das Gegenteil zu. Ausgerechnet Menschen mit einer Genvariante, die den Genuss beim Essen schmälert, tendieren zu Übergewicht. Anscheinend essen sie mehr, um sich doch noch die erhoffte Befriedigung zu verschaffen. Das haben Eric Stice von der University of Texas in Austin und Kollegen jetzt anhand von zwei Studien mit weiblichen Jugendlichen herausgefunden.

Während die Teilnehmerinnen ein Glas Trinkschokolade schlürften, registrierten die Forscher mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomografie die Aktivität des dorsalen Striatums. Dieser Teil des Großhirns ist dafür bekannt, beim Essen das Glückshormon Dopamin auszuschütten. Reizt der Botenstoff die dort ebenfalls vorhandenen Dopamin-D2-Rezeptoren, entsteht ein Gefühl von Befriedigung.

Bei den übergewichtigen Probanden stellten die Forscher eine deutlich geringere Aktivität im Striatum fest. Tatsächlich ist, wie man schon länger weiß, bei solchen Menschen die Anzahl von Dopaminrezeptoren um bis zu 40 Prozent verringert. Ein Großteil der übergewichtigen Versuchspersonen trug jedoch außerdem eine Genvariante (das Allel TaqIA A1), welche das Dopaminsignal dämpfte. Bei ihnen konnten die Wissenschaftler mit hoher Genauigheit vorhersagen, um wie viel ihr Body Mass Index (BMI) im nächsten Jahr zunehmen würde.

Vielleicht ist es für Übergewichtige ein Trost zu wissen, dass eine genetische Disposition zu ihrem Problem beiträgt. Möglicherweise hilft es ihnen aber auch, den Mechanismus des Dickwerdens zu durchschauen, um besser dagegen ankämpfen zu können.

Science, Bd. 322, S. 449

PHYSIK

Röntgen mit Tesafilm

■ Es ist schon lange bekannt, dass beim Zermalmen von Zuckerkristallen oder dem Abrollen von Klebeband schwache, im Dunkeln sichtbare Lichtblitze entstehen. Über die genaue Ursache dieses Triboluminszenz genannten Phänomens rätseln die Physiker noch. Klar ist nur, dass dabei mechanische Energie aufkonzentriert und in Form von Licht abgegeben wird.

Forscher um Seth Putterman von der University of California in Los Angeles haben die Erscheinung nun systematisch untersucht. Sie ließen einen Motor einen Klebefilm in einer Vakuumapparatur mit der konstanten Geschwindigkeit von drei Zentimetern pro Sekunde abrollen, während ein Detektor die abgegebene Strahlung maß. Dabei bestätigten sich meist als unglaubwürdig eingestufte frühere Berichte, wonach sich das Energiespektrum bis in den Röntgenbereich erstreckt. Die energiereichsten Photonen lagen mit zehn Gigaelektronvolt sogar in der Gammaregion. Als eindrucksvolle Demonstration des Effekts erzeugten die Forscher die Röntgenaufnahme eines Fingers.

Trotz der konstanten Zugkraft des Motors rollte das Klebeband nicht gleichmäßig ab, sondern blieb immer wieder kurz hängen und riss sich dann ruckartig los. Genau in diesem Moment traten die Röntgenblitze auf, und sie waren umso energiereicher, je heftiger der Ruck ausfiel. Putterman und seine Kollegen vermuten deshalb, dass Elektronen von der negativ geladenen Rollenoberfläche zum positiv geladenen Filmstreifen fliegen und dabei in dem elektrischen Feld zwischen beiden so stark beschleunigt werden, dass sie bei ihrem Auftreffen Bremsstrahlung im Röntgenbereich aussenden.

Nature, Bd. 455, S. 1089

CARLOS CAMARA, JUAN ESCOBAR UND SETH PUTTERMAN, UCLA

Die Röntgenstrahlung beim Abziehen von Klebebandrollen ist so intensiv, dass damit die Durchleuchtung des kleinen Fingers in drei Aufnahmen gelang.

Mitarbeit: Jan Hattenbach und Vera Spillner

Süßer Kuss für heiße Biene

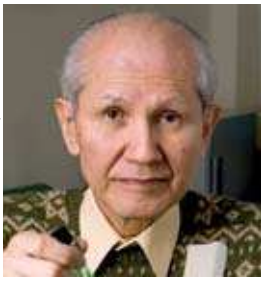
Das Brutnest der Honigbienen wird von »Heizerinnen« auf einer Temperatur von 35 Grad Celsius gehalten. Diese erzeugen durch Muskelzittern die nötige Wärme und »verbrennen« dafür Honig. Das Honiglager liegt allerdings weit vom Brutnest entfernt, und die Heizerbienen sind nach bis zu 30 Minuten Zittern derart erschöpft, dass sie es nicht mehr bis dahin schaffen würden. Deshalb existiert für ihre Versorgung eine eigene Berufsgruppe: die »Tankstellenbienen«. Diese pendeln zwischen den Honigvorräten und dem Brutnest hin und her und übertragen ihren erschöpften Stockgenossinnen den energiereichen Sirup von Mund zu Mund. Die Heizerbiene (oben) streckt dabei zum Honigsaugen ihre Mundwerkzeuge zwischen die Mandibeln der Spenderin (unten).

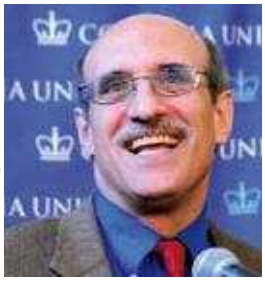
JÜRGEN TAUTZ UND HELGA R. HEILMANN, BIOZENTRUM UNIVERSITÄT WÜRZBURG

NOBELPREIS FÜR CHEMIE Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Grünes Licht für Biologen

Der Chemienobelpreis ging an Osamu Shimomura, Martin Chalfie und Roger Y. Tsien für die Entdeckung und Weiterentwicklung des grün fluoreszierenden Proteins GFP, das inzwischen zu den Standardwerkzeugen der Molekular- und Zellbiologen gehört.


MARINE BIOLOGICAL LABORATORY, TOM KLEINDINST


COLUMBIA UNIVERSITY, EILEEN BARROSO

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO

Osamu Shimomura (links) hat das grün fluoreszierende Protein (GFP) der Qualle *Aequoria victoria* isoliert, **Martin Chalfie** (Mitte) es erstmals zum Nachweis aktiver Gene benutzt und **Roger Y. Tsien** (rechts) seine Struktur bestimmt sowie die Farbpalette entscheidend erweitert.

Von Michael Groß

Das grüne Leuchten der Qualle *Aequorea victoria* ist schon seit über einem halben Jahrhundert bekannt. In der wissenschaftlichen Literatur wurde es erstmals 1955 erwähnt. Als Osamu Shimomura, der dienstälteste Forscher unter den Preisträgern, 1960 an die Princeton University (New Jersey) kam, machte er sich auf die Suche nach dem molekularen Hintergrund des Phänomens. An der Universität in Nagoya (Japan) hatte er bereits Erfahrung in der Biolumineszenzforschung gesammelt. Und so gelang es ihm rasch, mit den gängigen Methoden zur schrittweisen Anreicherung von Proteinen eine leuchtende Substanz zu isolieren und zu charakterisieren. Er taufte sie nach dem Namen der Qualle Aequorin.

Wirklich zufrieden konnte Shimomura mit dem Ergebnis dennoch nicht sein; denn schon der Augenschein demonstrierte – ebenso wie natürlich die spektroskopische Untersuchung – einen Schönheitsfehler: Das Molekül strahlte blau, nicht grün. Der Fund erwies sich zwar als durchaus nützlich, weil Aequorin nur in Gegenwart von Kalziumionen aufleuchtet und deshalb als Indikator für diesen biologisch wichtigen Botenstoff dienen kann. Aber das eigentliche Ziel, die Quelle des grünen Lichts aufzuspüren, hatte Shimomura verfehlt.

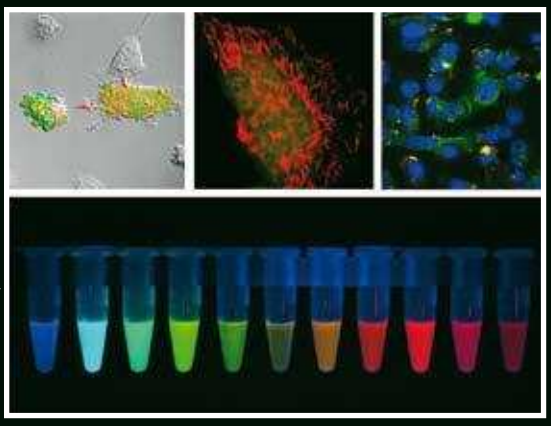
Und so setzten der Forscher und seine Mitarbeiter die Suche fort. Im Jahr 1962 isolierten sie schließlich einen zweiten Kandidaten: ein Protein, das nun wirklich intensives grünes Fluoreszenzlicht aussandte und deshalb schlicht den Namen GFP erhielt. Es enttäuschte die Erwartung der Forscher allerdings insofern, als es im Unterschied etwa zur Luciferase der Glühwürmchen die Energie für das Leuchten nicht aus einer chemischen Reaktion bezieht. Vielmehr muss es mit blauem oder ultraviolettem Licht angeregt werden.

Das brachte Shimomura auf eine Idee: Die blaue Anregung zu liefern, könnte genau die Aufgabe des Aequorins in der Qualle sein. Mit weiteren biophysikalischen und vor allem spektroskopischen Untersuchungen gelang es dem Team des Laureaten, diese Vermutung zu bestätigen: Die Wellenlänge, bei der das Aequorin am stärksten strahlt, fällt praktisch mit derjenigen zusammen, die das GFP am effizientesten absorbiert und in grünes Licht umwandelt.

Nun ist es für die praktische Nutzung eines Proteins von Vorteil, auch das zugehörige Gen zu kennen. Dieser Aufgabe widmete sich Douglas C. Prasher gut ein Jahrzehnt später, als es dafür die nötigen Methoden gab. Geduldig identifizierte und entzifferte er 1985 zunächst das Aequorin- und 1992 dann auch das GFP-Gen. Um die Einladung nach Stockholm hat er sich allerdings mit einer fatalen Fehleinschätzung gebracht. Das Gen würde, so seine Annahme, ei-

SIERRA BLAKELY

Das grün fluoreszierende Protein der Qualle *Aequoria victoria* (links) ist ein Zylinder (rechts), in dessen Zentrum das Chromophor (farbgebende Strukturelement) thront wie der Leuchtfaden in einer Glühbirne. Die Zylinderwände werden von Aminosäuren gebildet, die sich zu so genannten Beta-Faltblättern (Pfeile) aneinandergelagert haben.



UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO

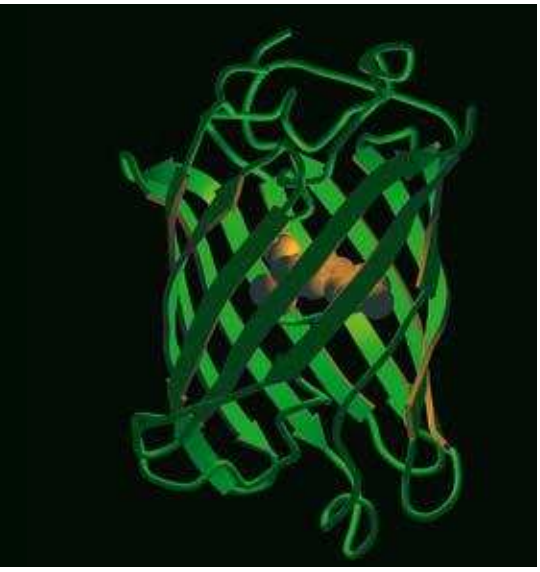
Roger Y. Tsien hat entscheidend dazu beigetragen, dass die GFP-Farbpalette heute, wie in den Reagenzgläsern unten gezeigt, den gesamten Regenbogen überspannt. Dadurch lässt sich in Geweben die Aktvierung verschiedener Gene gleichzeitig verfolgen – oben drei Beispiele.

nen anderen Organismus als die Qualle wohl kaum fluoreszieren lassen, weil dafür zusätzliche Faktoren nötig seien, über die nur *A. victoria* verfüge.

Nachdem Prasher sein Resultat einschließlich der pessimistischen Prognose veröffentlicht hatte, gab er das Projekt auf, reichte aber seine Materialien an Martin Chalfie von der Columbia University in New York weiter. Der ließ sich nicht beirren und schleuste das Gen kurzerhand in das Erbgut des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans* ein. Diesen Nematoden, einen der beliebtesten Modellorganismen unter Biologen, hatte er vorher schon erforscht – als Postdoc bei Sydney Brenner in Cambridge (England), der für seine Untersuchungen zur Entwicklungsbiologie von *C. elegans* 2002 den Medizinnobelpreis erhielt.

Chalfie interessierte sich für die Frage, in welchen Zellen des Wurms das Gerüstprotein Beta-Tubulin hergestellt wird. Also baute er das GFP-Gen so ein, dass es denselben Regulatoren unterworfen war wie die Bauanleitung für den Eiweißstoff, aus dem die röhrenförmigen Mikrotubuli bestehen. Wie erhofft, erschien die grüne Fluoreszenz selektiv an wenigen Stellen – nämlich in genau sechs Nervenzellen, die als Berührungssensoren dienen und deshalb große Mengen des Beta-Tubulins benötigen.

Es steht zu vermuten, dass dies die erste mit dem Nobelpreis gekrönte Arbeit ist, die ursprünglich (1993) in der »Wormbreeder's Gazette«, also im »Wurmzüchterblatt«, veröffentlicht wurde. Immerhin erschien die nächste, umfassendere Darstellung, die auch über die erfolgreiche Einschleusung des Gens in Bakterien berichtete, im folgenden Jahr in angemessenerem Rahmen: als Titelgeschichte der renommierten Zeitschrift »Science«.



UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO

Ein Leuchten geht um die Welt

Danach breitete sich das grüne Leuchten wie eine Epidemie in den molekular- und zellbiologischen Labors rund um die Welt aus (Spektrum der Wissenschaft 5/1995, S. 30). Chalfies Wurmversuch hatte schon klargemacht, für welch vielfältige Zwecke sich das Quallenprotein eignet. Man braucht es nur mit dem interessierenden Gen zu koppeln, und schon erhält man einen leuchtenden Nachweis darüber, wann und wo dieses Gen aktiv ist. Benötigt wird dazu lediglich eine UV-Lampe, die sowieso in jedem molekularbiologischen Labor steht.

Doch auch das nützlichste Werkzeug lässt sich noch verbessern und abwandeln. Hierin liegt das Verdienst des dritten Preisträgers, Roger Y. Tsien. Wie er mit seiner Arbeitsgruppe an der University of California in San Diego herausfand, ist Sauerstoff nötig, bevor das GFP nach seiner Synthese erstmals aufleuchtet; später funktioniert die Fluoreszenz auch ohne das Gas. Damit war für den Forscher klar: Dem zunächst gebildeten Protein fehlt noch das Chromophor; dieser für die Fluoreszenz verantwortliche, speziell geformte Molekülteil entsteht erst nachträglich unter Mitwirkung von Sauerstoff. Dabei schließt sich ein Abschnitt der normalerweise linearen Aminosäurekette unter Dehydrierung und Abspaltung eines Wassermoleküls zu einem Ring, dessen Prototyp Chemiker als Imidazolon bezeichnen.

Tsien vermutete weiterhin, dass sich die Wellenlänge der Fluoreszenz durch gezielten Austausch einzelner Aminosäuren beeinflussen lässt. Tatsächlich produzierte sein Labor schon bald GFP-Varianten in vielen verschiedenen Farben. Dadurch können Molekularbiologen nun die Aktivität mehrerer Gene gleichzeitig im Lichtmikroskop verfolgen.

Das besonders begehrte Rot, das wegen seiner großen Wellenlänge biologisches Gewebe am besten durchdringt, ließ sich zunächst allerdings nicht erzeugen. Auch für dieses Problem fand Tsiens Gruppe jedoch eine Lösung, indem sie ein rot fluoreszierendes Protein aus Korallen namens DsRed stark vereinfachte. Außerdem trug das Team zur Aufklärung der Molekülstruktur des GFP bei (Spektrum der Wissenschaft 11/1997, S. 16). Das Protein erwies sich als hochgradig symmetrischer Zylinder, in dessen Zentrum das Chromophor thront wie der Leuchtfaden in einer Glühbirne.

Die Geschichte des GFP illustriert exemplarisch, wie aus einer von purer Neugier getriebenen Entdeckung durch gezielte Weiterentwicklung eine bahnbrechende Neuerung hervorgehen kann, die eine ganze Disziplin befruchtet. Das Quallenprotein nutzt freilich nicht nur der biologischen Grundlagenforschung, sondern hat auch wichtige medizinische Anwendungen. So dürfte es zu einem tieferen Verständnis des Tumorwachstums und der Entstehung des Alzheimersyndroms beitragen.

Selbst in der Umweltüberwachung lässt es sich einsetzen. So kann es zum Nachweis von Arsen in Brunnen in Südostasien dienen, wo das Grundwasser oft mit dem Gift belastet ist. Außerdem haben Wissenschaftler Organismen erzeugt, die in Gegenwart des Explosivstoffs TNT oder von Schwermetallen wie Kadmium oder Zink grün fluoreszieren. Selbst im Dunkeln leuchtende Spielzeuge enthalten neuerdings das Quallenprotein. Den Grundstein zu dieser Erfolgsgeschichte haben die drei Laureaten mit ihrer geduldigen, systematischen Arbeit gelegt.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

NOBELPREIS FÜR PHYSIK Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Symmetriebrüche in der Natur

Der Nobelpreis für Physik würdigt die japanischen Theoretiker Yoichiro Nambu, Toshihide Maskawa und Makoto Kobayashi für ihre Erforschung der Gründe für den Bruch fundamentaler Symmetrien in der Teilchenwelt.

KYOTO UNIVERSITY, YUKAWA INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS

JAPAN SOCIETY FOR THE PROMOTION OF SCIENCE (JSPS)

UNIVERSITY OF CHICAGO

Toshihide Maskawa (links) und **Makoto Kobayashi** (Mitte) konnten 1972 die Brechung der CP-Symmetrie beim Zerfall des Kaons erklären. **Yoichiro Nambu** (rechts) erkannte schon 1961 das Prinzip der spontanen Symmetriebrechung, dem die Elementarteilchen ihre Masse verdanken.

Von Vera Spillner

Es braucht eine gehörige Portion Mut, gepaart mit fundiertem Wissen, die großen Fragen des Lebens zu stellen. Die diesjährigen Physiknobelpreisträger hatten beides. Und so fanden sie zumindest Teilantworten auf zwei alte Menschheitsfragen: »Warum gibt es überhaupt etwas?« und »Warum ist die Welt so vielgestaltig?« Alle drei Laureaten sind Experten auf dem Gebiet der Teilchenphysik und haben sich mit einem Problem beschäftigt, das Laien eher seltsam vorkommen dürfte: dem Bruch von Symmetrien. In der Physik spielt es aber eine zentrale Rolle.

Dahinter steckt die Beobachtung, dass sich die Welt gewöhnlich indifferent gegenüber Symmetrieoperationen verhält. Ob wir zum Beispiel eine Szene real oder im Spiegel sehen, können wir im Prinzip nicht unterscheiden. Das Spiegelbild erfüllt dieselben physikalischen Gesetze. Diese Symmetrieeigenschaft nennen Physiker Parität (P).

Ebenso wenig sollten wir es merken, wenn plötzlich jedes Teilchen des Universums gegen seinen Antimaterie-Partner ausgetauscht würde. Beide unterscheiden sich nur durch das Vorzeichen bestimmter Quantenzahlen wie der elektrischen Ladung. Das Gegenstück des Elektrons in der Anti-Welt ist also positiv geladen, hat aber sonst dieselben Eigenschaften.

Ändert man bei allen Teilchen einfach das Vorzeichen der Ladung, gelten die Gesetze des Elektromagnetismus und der klassischen Mechanik nach wie vor. Allgemein heißt diese Symmetrie-Eigenschaft »Invarianz unter Ladungskonjugation« und wird mit C für *charge* (englisch für »Ladung«) abgekürzt.

Beide Symmetrien waren für die Physiker lange Zeit selbstverständlich. Deshalb wirkte es wie ein Schock, als 1956 die späteren Nobelpreisträger Tsung Dao Lee und Cheng-Ning Yang herausfanden, dass die Spiegelsymmetrie keineswegs immer gilt, sondern beim radioaktiven Zerfall geringfügig verletzt ist. Wie sich zeigte, hat das eine tiefe Ursache: Eine der vier fundamentalen Kräfte, nämlich die schwache Kraft, wirkt nur auf Partikel mit einer bestimmten Schraubenrichtung in ihrem Spin – bildlich gesprochen, auf Exemplare mit einem Links- statt einem Rechtsdrall. Aus dem gleichen Grund gilt auch, dass der radioaktive Zerfall in einer Welt aus Antiteilchen ein anderes Ergebnis liefert als im uns vertrauten Kosmos.

Wenn ein fundamentales Konzept scheitert, suchen Physiker so viel wie möglich davon zu retten. So fanden sie auch in diesem Fall einen annehmbaren Ersatz: Kombiniert man eine Raumspiegelung mit einer Ladungskonjugation, sollte die Symmetrie wieder gelten; denn dann kompensieren sich die Effekte der schwachen Kraft gerade. Deshalb trösteten sich die Physiker mit dem Gedanken, die Natur sei zumindest invariant gegen eine solche CP-Transformation.

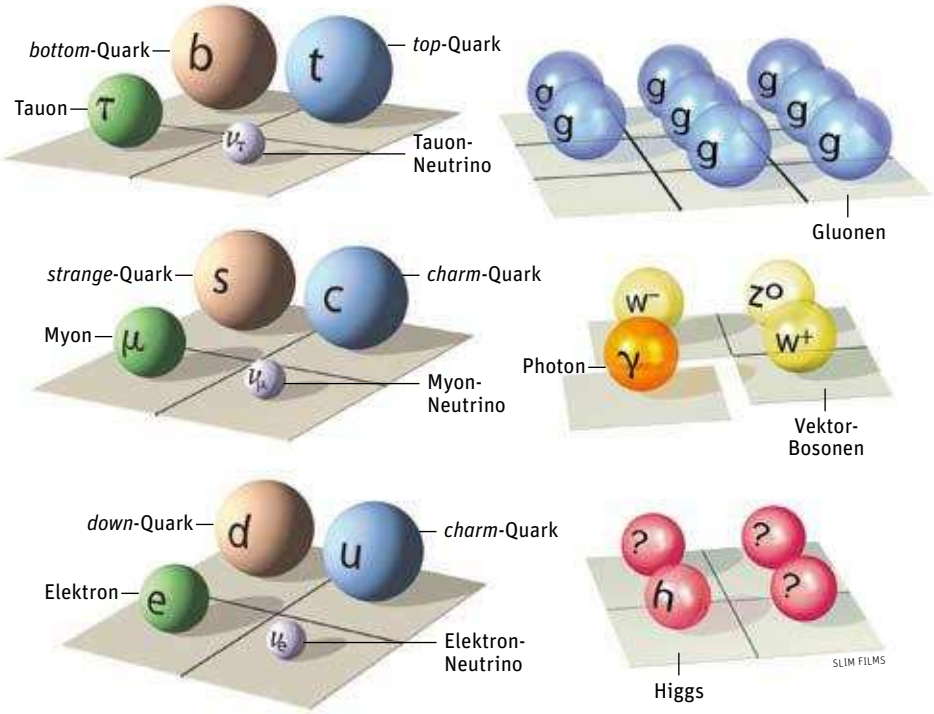
Doch 1964 rissen sie James Cronan und Val Fitch jäh auch aus dieser Illusion. Die beiden Forscher untersuchten den Zerfall eines relativ exotischen Elementarteilchens namens Kaon und seines Antiteilchens und fanden heraus, dass das Ergebnis auch bei Raumspiegelung unterschiedlich ist.

Was konnte der Grund dafür sein? Es dauerte acht Jahre, bis die beiden japanischen Forscher Toshihide Maskawa und Makoto Kobayashi die Lösung des Rätsels fanden – eine Leistung, für welche die inzwischen 68- und 64-jährigen Wissenschaftler nun je ein Viertel des Physiknobelpreises erhielten.

Damals, Anfang der 1970er Jahre, war bereits bekannt, dass es Quarks gibt, aus denen sich beispielsweise die Protonen und Neutronen des Atomkerns, aber eben auch die Kaonen zusammensetzen. Nachgewiesen waren das up-, down- und strange-Quark. Diese können sich, wie man ebenfalls wusste, ineinander umwandeln. Der italienische Physiker Nicola Cabibbo hatte die Übergangswahrscheinlichkeiten dafür berechnet. Sie steckten in einer Matrix mit zwei Zeilen und Spalten. Deren Einträge waren vier reelle Zahlen.

Als Kobayashi und Maskawa diese Matrix genauer in Augenschein nahmen, entdeckten sie, dass bei einer Erweiterung auf drei Zeilen und Spalten zusätzlich so genannte komplexe Phasen auftreten. Diese aber können, so die Erkenntnis der beiden Forscher, die beobachtete Verletzung der CP-Symmetrie erklären.

Allerdings warf die Erweiterung ein Problem auf: Für eine 3×3-Matrix reich-



Laut Standardmodell der Teilchenphysik existieren drei Familien von Elementarteilchen mit jeweils vier Mitgliedern (links). Toshihide Maskawa und Makoto Kobayashi postulierten schon 1972 die Existenz der dritten Familie. Als Trägerteilchen der elektromagnetischen, schwachen und starken Kraft fungieren das Photon, die drei Vektorbosonen W^+, W^- und Z^0 und die Gluonen. Das noch hypothetische Higgs-Boson (oder mehrere) verleiht, wie unter anderem Yoichiro Nambu erkannte, den Vektorbosonen und vielleicht auch anderen Elementarteilchen eine Masse.

ten die drei bekannten up-, down- und strange-Quarks nicht. Sie erforderte die doppelte Menge, also sechs. Es war zweifellos kühn, in einer Zeit, als die Physiker ohnehin über einen ausufernden Teilchenzoo stöhnten, mal eben die Zahl der Quarks zu verdoppeln. Doch wer immer das damals weit hergeholt fand oder darüber gelächelt haben mag, tat es nur bis 1974. Da wurde das erste der drei neuen Teilchen gefunden: das charm-Quark. 1977 und schließlich 1994 folgten das bottom- und das top-Quark – und bis heute ist kein weiteres aufgetaucht.

Warum es uns überhaupt gibt

Nun könnte man dies für ein marginales Detail halten, das nur Teilchenphysiker interessiert. Die Verletzung der CP-Symmetrie hat jedoch große Bedeutung für die Geschichte des Universums. Ohne sie wären beim Urknall gleich viele Teilchen und Antiteilchen entstanden. Wenn beide Partikelsorten aufeinandertreffen, vernichten sie sich jedoch gegenseitig und zerstrahlen in einem Gammablitz. Nur weil von Anfang an die Teilchen ein klein wenig bevorzugt wurden, waren sie leicht in der Überzahl, so dass im Mittel eines aus einer Milliarde überlebte. Aus den Überlebenden gingen die Sterne und Galaxien hervor, einschließlich des Sonnensystems, der Erde und uns Menschen selbst. Nur an diesem Effekt liegt es also, dass überhaupt etwas existiert.

Der dritte diesjährige Physiknobelpreisträger, der inzwischen 87-jährige Yoichiro Nambu, lieferte Einsichten zu der zweiten anfangs genannten Frage: Warum ist die (Teilchen-)Welt so vielfältig? Wieso gibt es vier verschiedene Kräfte, und woran liegt es, dass die Elementarteilchen verschiedene Massen haben?

Auch hier hängen die Antworten mit der Verletzung einer Symmetrie zusammen. Sie ist diesmal allerdings ursprünglich vorhanden und bricht erst irgendwann »spontan«. Was ist damit gemeint? Vielleicht kennen Sie die Geschichte von Buridans Esel, der zwischen zwei gleich großen und gleich weit entfernten Heuhaufen steht und verhungert, weil er sich für keinen entscheiden kann. In Wirklichkeit würde das Tier natürlich nicht starr am Fleck verharren, sondern zum Beispiel spontan den Kopf drehen. In dem Moment aber ist der eine Heuhaufen näher, und der Esel wählt diese Seite: Die Symmetrie wurde gebrochen.

Ähnlich verhält es sich bei einem Sombrero, auf dessen Spitze man einen Ball legt. Der bleibt da nicht liegen, sondern rollt auf Grund einer kleinen zufälligen Störung an irgendeiner Seite herunter. Dabei nimmt er eine energetisch günstigere, aber weniger symmetrische Lage ein.

Nambus Verdienst war es, die damals schon bekannte theoretische Beschreibung einer solchen spontanen Symmetriebrechung bei Metallen, die in den supraleitenden Zustand übergehen, auf die Welt der Elementarteilchen zu übertragen. Im Mittelpunkt steht dabei das so genannte Higgs-Feld, das bislang allerdings nur ein theoretisches Konstrukt ist und erst jetzt mit dem Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf nachgewiesen werden soll. Dieses Feld lag nach heutiger Vorstellung kurz nach dem Urknall in einer hochsymmetrischen, angeregten Form vor und ist bei der Abkühlung des Universums spontan – wie die Kugel auf dem Sombrero – in einen weniger symmetrischen Zustand übergegangen. Dabei wurde es für Teilchen spürbar: Es wirkt auf sie wie eine zähe Flüssigkeit. Dies ruft in unserer Welt die Erscheinung einer Masse hervor. Ohne das Higgs-Feld wären alle Elementarteilchen masselos.

Auch die Verschiedenheit der vier Grundkräfte lässt sich über eine spontane Symmetriebrechung erklären. Sie waren demnach ursprünglich in einer einzigen Kraft vereint und spalteten sich beim Übergang in den energieärmsten Zustand in vier Varianten auf.

Mit ihren theoretischen Untersuchungen haben die drei Preisträger wichtige Komponenten zum heutigen Standardmodell der Teilchenphysik beigesteuert. Dieses Modell ist aus allen experimentellen Überprüfungen bisher glänzend hervorgegangen. Am LHC muss es mit der Suche nach dem Higgs-Teilchen nun den finalen Test bestehen; zugleich werden Hinweise auf seine notwendige Erweiterung erwartet. Da ist es passend, dass drei seiner frühen Architekten mit der diesjährigen Preisvergabe eine späte Würdigung erfahren. Abgesehen davon verdienen Antworten auf große Fragen grundsätzlich gebührende Anerkennung, und auch Mut sollte stets belohnt werden.

Vera Spillner hat in Heidelberg, Minneapolis und Berlin Physik studiert und promoviert derzeit an der Universität Bonn in Philosophie.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Von Monopolisten und Ballungsräumen

Den Preis für Wirtschaftswissenschaften der schwedischen Reichsbank im Gedenken an Alfred Nobel erhielt Paul Krugman für seine »Analyse von Handelsstrukturen und der geografischen Verteilung wirtschaftlicher Aktivität«.

PRINCETON UNIVERSITY; BRIAN WILSON

Paul Krugman lieferte ein theoretisches Modell sowohl für die Vorteile der Erweiterung von Wirtschaftsräumen als auch für die Entstehung von Ballungsgebieten.

Von Christoph Pöppe

Der US-Ökonom Paul Krugman ist bekannt für seine zahlreichen, häufig langen und scharfzüngigen Online-Kommentare (»Blogs«) auf der Website der »New York Times«, in denen er die Wirtschaftspolitik der Regierung Bush heftig zu attackieren pflegt. Nur unter dem Datum vom 13. Oktober gibt er sich ungewöhnlich wortkarg. »Heute Morgen ist mir etwas Komisches passiert«, schreibt er lakonisch und lässt es bei einem Verweis auf eine Website der schwedischen Reichsbank bewenden. In der Tat: So ein Wirtschaftsnobelpreis kann einem schon die Sprache verschlagen. Tags darauf ist der frischgebackene Laureat aber schon wieder bei anderen Themen – die globale Finanzkrise bietet den Angehörigen seiner Profession derzeit ja jede Menge Stoff.

Der Preisträger ist nicht nur politisch exponiert, sondern für Nobel-Verhältnisse auch ungewöhnlich jung. Seinem zarten Alter von 55 Jahren zum Trotz hat er es allerdings bereits zu hohen akademischen Würden an der Yale University, dem Massachusetts Institute of Technology und der Stanford sowie der Princeton University gebracht. Außerdem durfte er sich 1982/ 1983 zu den Wirtschaftsberatern von Präsident Ronald Reagan zählen – was für den erklärten Anhänger des Wohlfahrtsstaats einem längeren Ausflug in Feindesland gleichkam. Immerhin hatte man für seine Begabung, wirtschaftliche Verhältnisse in einfachen Worten zu erklären, reichlich Verwendung; der größte Teil des »Economic Report of the President« von 1983 stammt aus seiner Feder.

Im Wahlkampf 1992 engagierte er sich intensiv für Bill Clinton und wurde schon als dessen künftiger wirtschaftlicher Chefberater gehandelt; aber als Präsident zog Clinton die Leute vor, die Krugman laut seinen autobiografischen Notizen »Incidents from my career« zu Reagans Zeiten bereits als zweitklassig beschimpft hatte. Da blieb ihm nichts übrig, als sich wieder der Forschung zuzuwenden.

Vielseitig und vor allem respektlos – das gilt nicht nur für Krugmans politische Aktivität, sondern auch für seine wissenschaftliche Arbeit. Selbst das, was man als ein Hauptthema unter seinen vielen Forschungsgebieten ausmachen kann, erhält von ihm einen etwas rebellischen Namen: *increasing returns* im Gegensatz zu den *diminishing returns*, die in den Lehrbüchern viel häufiger vorkommen und in der deutschen Literatur unter der marxschen Bezeichnung »Gesetz der fallenden Profitrate« geläufig sind.

Dabei sind die »wachsenden Profite« weder neu noch etwas Besonderes, sondern ein typisches Phänomen der Massenproduktion. Der Hersteller muss sehr viel Aufwand treiben, bis er das erste Stück seiner Ware produzieren kann; jedes weitere Exemplar kostet ihn dann relativ wenig. Die Gewinnmarge steigt also mit den Verkaufszahlen. Extrembeispiele sind Computerchips und Software.

Ihrer Allgegenwart zum Trotz wurden die *increasing returns* von den Wirtschaftswissenschaftlern eher stiefmütterlich behandelt, weil ihre Folgen theoretisch schwer zu fassen sind. Die klassische Ökonomie lebt vom Konzept des Gleichgewichts. Treffen sich auf einem Markt mehrere Anbieter und Interessenten für dieselbe Ware, stellt sich ein Gleichgewichtspreis ein. Dieser hängt nur von den gegenwärtigen Zuständen der Marktteilnehmer ab, während die Vergangenheit praktisch keine Rolle spielt.

Wenn jedoch *increasing returns* das Wirtschaftsgeschehen dominieren, bricht das Gleichgewichtskonzept zusammen, weil es keine Konkurrenten mehr gibt. Wegen der hohen Kosten für den Markteintritt hat ein Newcomer gegen einen etablierten Hersteller keine Chance.

Mehr Wohlstand bei größerem Wirtschaftsraum

Krugman gelang es, über die – altbekannte – Kritik an der klassischen Theorie hinauszugehen, indem er als Alternativentwurf ein mathematisches Modell ausarbeitete. Jeder Anbieter ist für die von ihm hergestellte Ware Monopolist und setzt deren Preis so fest, dass er seinen Gewinn maximiert. Die Preise wachsen nur deswegen nicht in den Himmel, weil der Interessent auf den Kauf auch verzichten kann. Vor allem sind ihm zwei Exemplare derselben Ware nicht doppelt so viel wert wie ein einziges, sondern deutlich weniger; die Ökonomen beschreiben das durch eine konkave Nutzenfunktion (Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 22). Eine zweite Waschmaschine zu haben reizt mich nicht besonders, während ich einer Digitalkamera, die ich noch nicht besitze, durchaus etwas abgewinnen kann.

Durch einige mutige, aber plausible Zusatzannahmen – der einzige nennenswerte Produktionsfaktor ist Arbeit, alle Käufer sind zugleich Arbeitnehmer bei einem der monopolistischen Hersteller, jeder von ihnen kann nur das ausgeben, was er durch seine Arbeit verdient – macht Krugman aus diesen Grundvoraussetzungen einen geschlossenen Wirtschaftskreislauf und damit ein Gleichungssystem. Dessen Unbekannte sind die Verkaufszahlen und Preise der verschiedenen Waren, Letztere ausgedrückt in Einheiten des – für alle gleichen – Stundenlohns.

Das gesamte Modell ist viel zu stark vereinfacht, als dass man irgendwelche Lösungen dieses Gleichungssystems mit der Realität des Wirtschaftslebens in Beziehung setzen könnte. Interessanter sind die abstrakteren Folgerungen. So kann man zwar in dem Modell nicht mit einem der bereits etablierten Produkte in den Markt eintreten, sehr wohl aber mit einem neuen. Da die Käufer zu dessen Gunsten auf den Erwerb dieser oder jener etablierten Ware verzichten, sinken allgemein deren Verkaufszahlen und damit die Monopolgewinne. Wenn sie auf null gefallen sind, lohnt sich für die nächsten potenziellen Produzenten der Markteintritt nicht mehr. Damit ist ein Gleichgewicht erreicht, das nicht von irgendwelchen Preisen, sondern von der Anzahl der Hersteller abhängt. Diese ist interessanterweise proportional der Gesamtzahl der arbeitenden Bevölkerung.

Daraus folgt: Je größer ein Wirtschaftsraum, desto vielfältiger ist das Angebot an Produkten, und desto mehr von ihnen kann man sich für den Lohn einer Stunde Arbeit kaufen. Damit liefert Krugman eine neue Erklärung dafür, warum Handel zwischen gleichartigen Partnern überhaupt stattfindet.

Nach der klassischen Handelstheorie sind verschiedene Gesellschaften von der Natur oder auf Grund ihrer Geschichte unterschiedlich ausgestattet: die eine reich an Kokospalmen, die zweite an Eisenerz, die dritte an Maschinenbauingenieuren. Da leuchtet es ein, dass jede von ihnen das, was sie im Überfluss hat, mit Gewinn gegen die Exportartikel der anderen eintauschen kann. Aber zwischen Volkswirtschaften, die sich in ihrer Ausstattung kaum unterscheiden, dürfte es praktisch keinen Handel geben, weil niemandem daraus ein Vorteil erwächst. Tatsächlich findet der größte Teil des Welthandels aber zwischen annähernd gleich ausgestatteten Industriestaaten statt. Das ist aus Krugmans Modell zu verstehen: Sowie die Grenze zwischen zwei gleichartigen, bislang voneinander getrennten Märkten geöffnet wird, ergibt sich ein neuer Wirtschaftsraum mit der doppelten Bevölkerung, der doppelten Produktvielfalt und entsprechend höherem Wohlstand.

Wenn, wie üblich, die Kosten für den Transport der Ware zum Konsumenten eine wesentliche Rolle spielen, kommen auch räumliche Effekte ins Spiel. So empfiehlt es sich für einen Hersteller, seine Fertigungsstätte dort anzusiedeln, wo die meisten potenziellen Kunden wohnen. Da das für alle Produzenten gilt, bilden sich Ballungsräume, in denen die Industrie zunächst sogar stärker konzentriert ist als die Bevölkerung. Diese wiederum schaffen einen Anreiz für die Menschen, sich ebenfalls dort anzusiedeln, denn erstens gibt es Arbeit, und zweitens sind wegen der geringeren Transportkosten die Industrieprodukte billiger als auf dem Land.

Mit dieser Rückkopplung erklärt Krugman, warum mit dem Aufkommen der industriellen Massenproduktion eine Massenmigration in die Städte einsetzt. Offen bleibt allerdings, wo derartige Ballungsgebiete entstehen. Hier kommt es wie in der Chaostheorie entscheidend auf die Anfangsdaten an, und die Geschichte spielt, anders als beim klassischen Marktgleichgewicht, eine wichtige Rolle, indem ein – möglicherweise sehr kleiner – historischer Standortvorteil stark vergrößert und damit zementiert wird.

Auf diese Weise ist es Krugman gelungen, zwei zuvor getrennte Gebiete der Wirtschaftswissenschaft, die Handelstheorie und die ökonomische Geografie, unter einem gemeinsamen theoretischen Dach zu vereinigen. Erweiterungen seiner Theorie betreffen unter anderem Situationen, in denen die klassischen Differenzen in der Ausstattung mit den neu erfassten Effekten zusammenwirken. Zahlreiche Untersuchungen, zum Teil mit Krugmans Beteiligung, haben für viele Einzelfälle gezeigt, dass die inzwischen fortgeschrittenen theoretischen Modelle gut mit der Realität übereinstimmen.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

NOBELPREIS FÜR MEDIZIN ODER PHYSIOLOGIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Sternstunden der Virologie

Mit dem Medizinnobelpreis wurden drei Virologen ausgezeichnet: Harald zur Hausen für den Nachweis, dass das Papillom-Virus Gebärmutterhalskrebs erzeugen kann, sowie Françoise Barré-Sinoussi und Luc Montagnier für die Entdeckung des Aids-Erregers HIV.

DKFZ HEIDELBERG

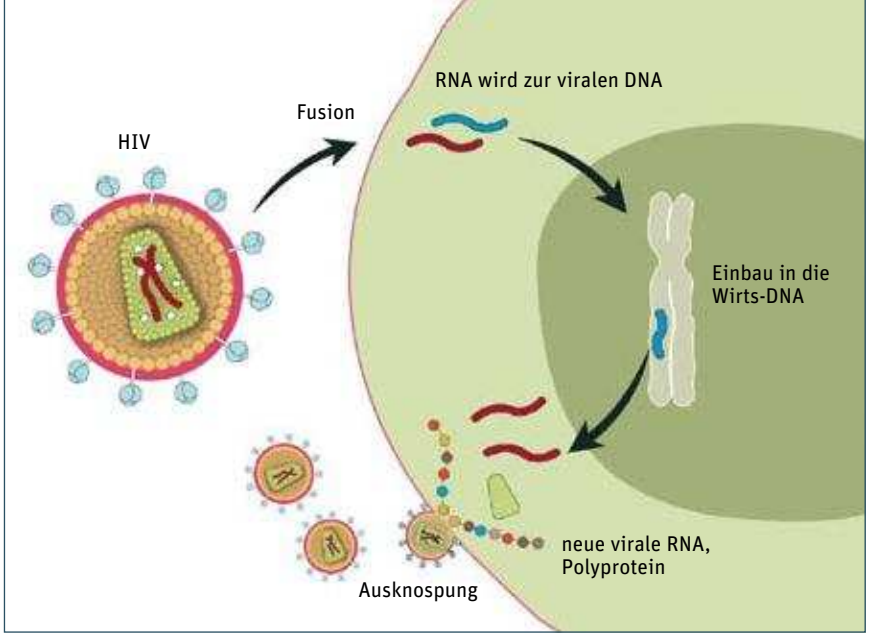
INSTITUT PASTEUR

UNESCO, MICHEL RAVASSARD

Harald zur Hausen (links) wies vor zwei Jahrzehnten nach, dass Viren entgegen dem herrschenden Dogma Krebs erzeugen können. **Françoise Barré-Sinoussi** (Mitte) und **Luc Montagnier** (rechts) gelang als Ersten die Isolierung des Erregers der erworbenen Immunschwäche Aids.

Von Claudia Eberhard-Metzger

Er kenne »bislang kein Virus, das Gutes bewirkt«, bekannte der Medizinnobelpreisträger Peter Medawar in den 1960er Jahren und legte künftigen Forschergenerationen ans Herz, den Viren und dem, was sie Menschen antun, höchste Beachtung zu schenken. Die drei Wissenschaftler, an die dieses Jahr der Medizinnobelpreis geht, haben Medawars Rat befolgt und durch Beschäftigung mit den »heimlichen Herrschern« Wege aufgezeigt, zwei der derzeit schlimmsten Menschheitsgeißeln – Aids und Krebs – entgegenzutreten. Der deutsche Mediziner Harald zur Hausen wies nach, dass es Viren gibt, die Krebs erzeu-



KAROLINSKA INSTITUTET

Das Humane Immunschwächevirus (HIV) befällt menschliche Immunzellen und schreibt dort seine RNA-Erbsubstanz mit Hilfe des Enzyms reverse Transkriptase in DNA um. Diese integriert sich in das Wirtsgenom. Bei der normalen, zelleigenen Genexpression entstehen Kopien der Virus-RNA sowie ein so genanntes Polyprotein, das durch eine virale Protease in die Proteinbausteine von HIV zerschnitten wird. Diese lagern sich mit der RNA zu neuen, infektiösen Viruspartikeln zusammen, die aus der sterbenden Wirtszelle ausknospen.

gen (siehe das nachfolgende Interview). Seine französischen Kollegen Françoise Barré-Sinoussi und Luc Montagnier entdeckten den Aids-Erreger: das Humane Immunschwächevirus (HIV). Es droht, die größte medizinische Katastrophe der Neuzeit zu verursachen, und übertrifft damit wohl noch Medawars schlimmste Befürchtungen.

Derzeit tragen rund um den Globus rund 32 Millionen Menschen das HI-Virus in ihrem Körper; etwa 25 Millionen sind seit Beginn der Pandemie an Aids gestorben. Die ersten dokumentierten Fälle traten in der zweiten Hälfte der 1970er Jahre etwa gleichzeitig in New York und San Francisco auf; im Lauf des Jahres 1981 zeigte sich, dass es sich um eine tödlich verlaufende Erkrankung handelte, die sich bedenklich unter zuvor gesunden homosexuellen Männern häufte. 1982 setzte sich die Erkenntnis durch, dass es die Menschheit mit einer neuen Krankheit zu tun hat, die durch ein stark geschwächtes Immunsystem und damit verbundene opportunistische Infektionen charakterisiert ist. Sie erhielt den Namen Acquired Immuno Deficiency Syndrome (Aids), auf Deutsch: erworbene Immunschwäche.

Während man in den USA 1981 ungefähr einen Erkrankungsfall pro Woche registrierte, waren es 1982 schon zehn und drei Jahre später rund 200. Die Zahl der Betroffenen schien unaufhaltsam zu wachsen: In fast allen Ländern der Welt diagnostizierten Ärzte Aids-Fälle. Außer männlichen Homosexuellen zählten auch Drogenabhängige oder die Empfänger von Bluttransfusionen zu den am stärksten gefährdeten Gruppen. All dies ließ vermuten, dass sich ein bislang unbekannter Erreger über Genitalflüssigkeiten und Blut ausbreitete. Mehrere Labors begannen daraufhin, Blutproben von Aids-Patienten zu untersuchen, um den Erreger der neuen tödlichen Krankheit zu identifizieren. Dazu zählte auch die Arbeitsgruppe des Virologen Luc Montagnier am Institut Pasteur in Paris.

Dank der kollektiven Fahndung gelang es so schnell wie selten zuvor in der Geschichte der Medizin, den gefährlichen Erreger aufzuspüren. Robert Gallo, Leiter des Tumorvirus-Labors an den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland), vermutete zu Recht, dass es sich um ein Retrovirus handle, das sein RNA-Erbgut in der Wirtszelle in DNA umschreiben lässt. Allerdings glaubte er irrtümlich, es gehöre zur Gruppe der Humanen T-Zell-Leukämie-Viren (HTLV), und suchte deshalb in der falschen Richtung.

Luc Montagnier und seine Mitarbeiterin Françoise Barré-Sinoussi konnten das richtige Virus in den Jahren 1982 bis 1984 aus geschwollenen Lymphknoten von Aids-Patienten in einem frühen Erkrankungsstadium isolieren und als Lentivirus identifizieren. Sie gaben ihm den Namen Lymphadenopathie-assoziiertes Virus (LAV). Auch das Labor von Gallo erhielt Material von Montagnier. Durch ein Versehen arbeitete die Gruppe des US-Forschers in der Folge unwissentlich mit dem französischen Virus und konnte den Nachweis führen, dass es tatsächlich der Verursacher von Aids ist. Allerdings glaubte Gallo weiterhin, er habe es mit seinen eigenen, aus Krebszellen isolierten HTL-Viren zu tun, und gab dem Erreger deshalb den Namen HTLV-III. Dies führte zu einer Kontroverse, die erst 1986 entschieden wurde. In internationaler Übereinkunft erhielt der neue Erreger damals die heutige Bezeichnung HIV.

Noch länger wogte der Streit darüber, wem das Verdienst zukomme, das Virus entdeckt zu haben, und vor allem wer die Verwertungsrechte für den ersten, 1984 entwickelten HIV-Antikörpertest beanspruchen könne. Die Auseinandersetzung wurde im Jahr 1987 gar zum Thema eines Gipfeltreffens zwischen Jacques Chirac, damals noch Premierminister unter Mitterrand, und dem US-Präsidenten Ronald Reagan, die salomonisch entschieden, beide Forscher sollten von nun an als Entdecker gelten und sich die Einnahmen teilen. Im Zeichen dieser Übereinkunft schrieben Montagnier und Gallo gemeinsam einen Artikel über das Virus und seine Entdeckungsgeschichte in Spektrum der Wissenschaft (12/1988, S. 48).

Das Nobelkomitee würdigt zwar die Arbeiten Gallos, hat den Preis aber allein den beiden französischen Forschern zugesprochen – auch weil das Reglement mehr als drei Preisträger verbietet. In der Begründung heißt es, dass Françoise Barré-Sinoussi und Luc Montagnier das Virus entdeckt und die Voraussetzungen dafür geschaffen hätten, das HIV-Genom zu klonen und eine medikamentöse Behandlung zu entwickeln.

Diese Entscheidung ist nicht unumstritten; dennoch dürfte damit eines der unerfreulichsten wissenschaftlichen Gerangel um Ehre, Ruhm und Geld beendet sein. Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Viren und anderen Erregern schlimmer Menschheitsplagen geht dagegen weiter. »Unsere Beziehung zu krank machenden Mikroben ist Teil eines evolutionsbiologischen Dramas«, kommentierte Joshua Lederberg, der 1958 den Nobelpreis für die Erforschung des Erbguts von Bakterien erhielt: »Und es gibt keine Garantie, dass wir in diesem Kampf die Überlebenden sind.«

»Den Impfstoff hätte es schon Jahre früher geben können«

Harald zur Hausen, der diesjährige Nobelpreisträger für Medizin, im Gespräch mit »Spektrum der Wissenschaft«

DKFZ HEIDELBERG

ZUR PERSON

Harald zur Hausen wurde 1936 in Gelsenkirchen geboren. Er studierte an den Universitäten Bonn, Hamburg und Düsseldorf Medizin und Biologie. Danach arbeitete er am Institut für medizinische Mikrobiologie der Universität Düsseldorf. Nach einem dreijährigen Forschungsaufenthalt im Children's Hospital of Philadelphia in den Vereinigten Staaten kehrte er nach Deutschland an das Institut für Virologie der Universität Würzburg zurück; später arbeitete er an den Universitäten von Erlangen-Nürnberg und Freiburg. Von 1983 bis 2003 war er wissenschaftlicher Stiftungsvorstand des Deutschen Krebsforschungszentrums in Heidelberg.

Von Claudia Eberhard-Metzger

Im Büro von Harald zur Hausen stapelt sich der Ruhm kiloweise. Auf dem Schreibtisch, den Stühlen und Schränken – auf jedem freien Platz liegen Mappen und Ordner mit Glückwunschbriefen, dazwischen Listen mit den Namen von Anrufern. »Und im Computer warten wohl noch mal so rund 2000 E-Mails«, sagt zur Hausen. Gerade noch hat er in die Kamera eines Fotografen gelächelt, davor ein Interview für die Lokalpresse gegeben, jetzt folgt schon das nächste. Und auch dieses Gespräch wird heute noch lange nicht das letzte sein: ein Wissenschaftler im Nobelpreis-Stress.

Der Virologe Harald zur Hausen ist einer der drei frisch gekürten diesjährigen Nobelpreisträger für Medizin (siehe S. 19). Er habe »herrschende Dogmen« in Frage gestellt und die »Richtigkeit einer brillanten Idee mit beharrlicher Arbeit bewiesen«. So lobt ein Mitglied des Nobelkomitees die Leistung des Forschers. Dessen brillante Idee war, dass es Viren gebe, die Krebs erzeugen – und dass davor womöglich eine Impfung schützen könne. Solche Gedanken galten noch vor zwei Jahrzehnten als eher abwegig. Doch 2006 war es so weit: Der erste Impfstoff gegen eine Krebsart, Gebärmutterhalskrebs, kam auf den Markt. Dass er entwickelt werden konnte, ist den grundlegenden Arbeiten von Harald zur Hausen und seinen Mitarbeitern in den 1970er und 1980er Jahren zu verdanken.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor zur Hausen, wie geht es Ihnen?
Prof. Dr. Harald zur Hausen: Gut. Sehr gut. Vielleicht ein wenig müde.
Spektrum: Hat sich seit vergangener Woche viel für Sie verändert?
zur Hausen: Doch, einiges. In jedem Fall ist mein Zeitplan komplett durcheinandergeraten. Ich habe tagelang Interviews gegeben, Telefonate geführt, und ich bin unentwegt gefilmt und fotografiert worden. Ich wünschte mir oft, ich wäre Gerhard Schröder und könnte wie er so schön auf Kommando in die Kameras lächeln. Aber so langsam lerne ich das auch. Im Augenblick stehe ich vor der großen Schwierigkeit, die mir vorliegende Korrespondenz auch nur einigermaßen angemessen zu erledigen.
Spektrum: Was hätten Sie getan, wenn der Anruf aus Stockholm nicht gekommen wäre?
zur Hausen: Normal weitergearbeitet. Ich habe ja auch im Ruhestand immer noch die Möglichkeit, mich hier im Labor in der Tumorvirologie ein wenig zu betätigen. Zudem beschäftige ich mich intensiv mit dem »International Journal of Cancer«, dessen Chefredakteur ich bin. Daran habe ich auch gesessen, als ich angerufen wurde.
Spektrum: Und der Anruf hat Sie überrascht?
zur Hausen: Ja, er hat mich wirklich überrascht. Ich habe letztes Jahr damit gerechnet, ein bisschen zumindest, weil ich aus dem Umfeld einige Zeichen bekommen hatte. Als ich am Tag der Bekanntgabe frühmorgens in mein Büro hier im Krebsforschungszentrum fuhr und im Radio hörte, dass heute der Preisträger genannt wird, habe ich schon mit einer gewissen Spannung daran gedacht. Im Lauf des Morgens habe ich es dann jedoch wieder vergessen. Ich weiß auch nicht, irgendwie hatte ich anderes zu tun.
Spektrum: Und dann klingelte das Telefon.
zur Hausen: Ja, um 10.45 Uhr, als ich hier am Schreibtisch saß. Ich habe den Hörer abgenommen und hörte eine Stimme mit schwedischem Akzent. Man hat mir zum Preis gratuliert und einige Einzelheiten mitgeteilt.
Spektrum: Zum Thema »Wie verhalte ich mich, wenn ich den Nobelpreis bekomme«?
zur Hausen: Ja. Man bat mich beispielsweise, noch 45 Minuten Stillschweigen zu bewahren, bis die offizielle Bekanntgabe erfolgt sei. Ich muss allerdings gestehen, ich habe das nicht eingehalten und gleich meine Frau angerufen. Sie saß gerade im Flugzeug nach Buenos Aires und hatte ihr Han-

dy noch nicht abgeschaltet. Meine Frau hat das Embargo dann allerdings ebenfalls gebrochen und noch vom Flieger aus die Verwandtschaft informiert. Das waren auch die ersten Gratulanten.

Spektrum: Und wie schnell hat es sich hier im Deutschen Krebsforschungszentrum herumgesprochen?

zur Hausen: Meine Mitarbeiterin im Vorzimmer hat es natürlich gleich mitbekommen. Aber sonst haben wir es niemandem verraten. Um halb zwölf erfolgte dann die offizielle Mitteilung. Und ab dann war der Teufel los. Von dem Moment an gab es keine ruhige Minute mehr, das ging bis abends halb elf. Die Nacht, muss ich gestehen, habe ich schlecht geschlafen. Aber jetzt habe ich mich daran gewöhnt.

Spektrum: In einer Zeitung stand als frühe Reaktion, der diesjährige Medizinnobelpreis sei so etwas wie ein Sieg der Pharmaindustrie.

zur Hausen: Das ist Unsinn. Das könnte man vielleicht so interpretieren, wenn ich Geld von der Pharmaindustrie erhalten würde. Aber das tue ich nicht. Nur das Haus, also das Krebsforschungszentrum, ist in geringem Umfang an den Einnahmen beteiligt, die mit dem Impfstoff erzielt werden. Auch einige Mitarbeiter sind das. Ich war seinerzeit wissenschaftlicher Stiftungsvorstand des Zentrums und bin schon allein aus diesem Grund nicht in die Patente eingeschlossen. Aber manche wollen das nicht einsehen. So sind das hier nicht nur Glückwunschbriefe, in einigen werde ich auch beschimpft.

Spektrum: Den Vorwurf, dass der derzeit von zwei Firmen vertriebene Impfstoff gegen Humane Papillom-Viren, die Verursacher von Gebärmutterhalskrebs, mit rund 450 Euro pro geimpfter Person zu teuer ist, werden Sie schon oft gehört haben.

zur Hausen: Beides ist korrekt.

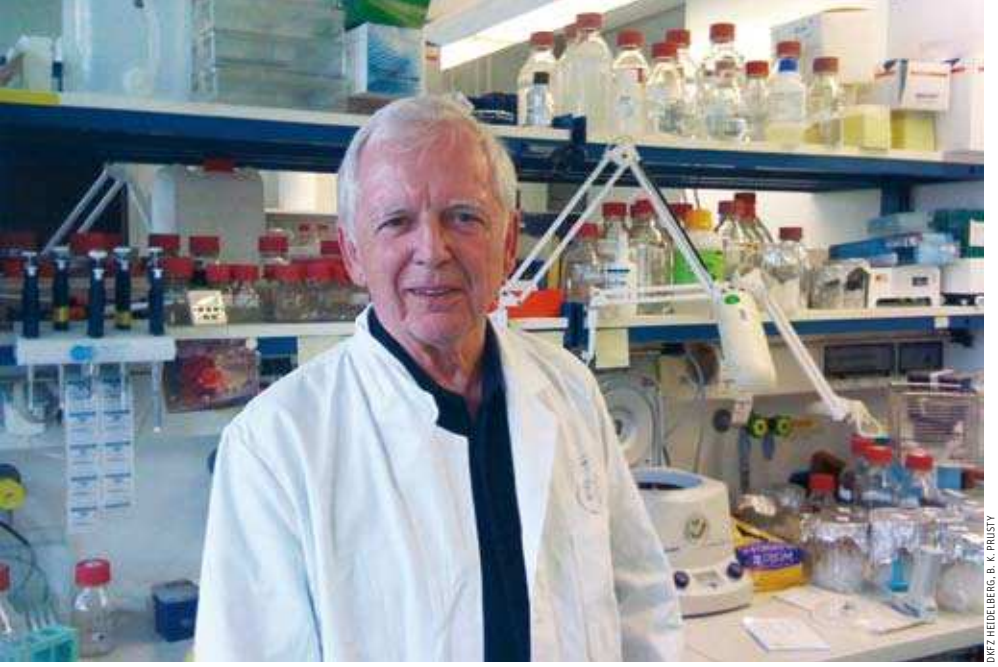
Spektrum: Und Sie haben immer wieder gesagt, Ihnen sei viel daran gelegen, dass sich der Preis erniedrigt. Eine Idee ist ja, den Herstellungsprozess so zu verändern, dass der Impfstoff kostengünstiger produziert werden kann.

zur Hausen: Da gibt es durchaus interessante Ansätze. Einer ist, an Stelle der bislang verwendeten virusähnlichen Partikel nur noch das Hauptstrukturantigen des Virus zu verwenden, das einfacher in Bakterien hergestellt werden kann. Es gibt auch Versuche, den Impfstoff mittels gentechnisch veränderter Pflanzen zu produzieren. Das ist meine Erachtens aber keine wirkliche Alternative, weil die dafür erforderlichen Reinigungsprozesse zu aufwändig sind. Viel versprechend scheint mir dagegen die Verwendung so genannter adenoassoziierter Viren als Vehikel für eine Art Gentherapie. Mit diesen winzigen Viren lässt sich Papillom-Virus-Erbgut gezielt in Zellen der Nasenschleimhaut einbringen. Die infizierten Zellen setzen das virale Erbgut frei

Am Tag der Bekanntgabe des Medizinnobelpreises an Harald zur Hausen herrschte erwartungsgemäß hektische Betriebsamkeit im Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg.

Obwohl emeritiert, macht sich der Nobelpreisträger noch gelegentlich in seiner früheren Wirkungsstätte, dem Labor für Tumorvirologie am Krebsforschungszentrum, zu schaffen.

DKFZ HEIDELBERG



DKFZ HEIDELBERG, B. K. PRUSTY

und produzieren eigenständig virusähnliche Partikel, die das Immunsystem zur Gegenwehr anregen. Die Teilchen werden langsam freigesetzt, weshalb der Immunschutz etwas später einsetzt, dafür aber stärker ausfällt und länger anhält. Nach Untersuchungen an Tieren könnte eine einzige derart verabreichte Impfdosis ausreichen, um vollen Impfschutz zu erreichen. Das halte ich für den interessantesten Ansatz. Ich hoffe, dass die Industrie daran Interesse finden wird.

Spektrum: Der Impfstoff ist auch wegen zweier Todesfälle in die Kritik geraten, die sich angeblich nach der Impfung ereignet haben. Ein ursächlicher Zusammenhang ließ sich zwar nicht nachweisen. Dennoch hat diese Nachricht zu Verunsicherungen geführt. Für wie sicher halten Sie den Impfstoff?

zur Hausen: Nach meinen Informationen wurden weltweit bislang 14 Millionen Frauen geimpft, in Deutschland sind es über 800 000. Viele tausend Frauen haben außerdem zuvor an den klinischen Tests teilgenommen. Auf Grund der bisherigen Erfahrungen halte ich die Sicherheit des Impfstoffs für sehr hoch. Wobei man immer hinzufügen muss, dass es keine Impfung ohne Risiko gibt. So kann man schwere allergische Reaktionen grundsätzlich nie ausschließen. Meines Erachtens ist der HPV-Impfstoff genauso sicher wie jeder andere.

Spektrum: Gebärmutterhalskrebs ist vor allem auch ein Problem in Ländern der dritten Welt, wo es keine flächendeckenden Krebsfrüherkennungsprogramme und schon gar kein Geld für einen der teuersten Impfstoffe aller Zeiten gibt. Was geschieht, um auch die Frauen in armen Ländern zu schützen?

zur Hausen: Weltweit erkranken rund 500 000 Frauen an Gebärmutterhalskrebs, 240 000 bis 270 000 sterben daran – die meisten in den Entwicklungsländern, wo 83 Prozent aller Fälle auftreten. Ein erschwinglicher Impfstoff, den sich auch die Menschen in armen Ländern leisten können, ist dringend erforderlich. Ich hoffe da kurz- und mittelfristig auf die Kräfte des Marktes. Es gibt nämlich mittlerweile eine Reihe von Firmen in Entwicklungsländern, die offenbar bereits damit begonnen haben, den Impfstoff zu produzieren. Wenn ihre Seren erst die klinischen Tests erfolgreich durchlaufen haben und auf den Markt kommen, werden sich die Preise zwangsläufig erniedrigen müssen.

Spektrum: Doch das ist Zukunft. Was geschieht jetzt, um den Impfstoff dort bereitzustellen, wo er am nötigsten ist?

zur Hausen: Es gibt Programme der American Health Organisation und der Weltgesundheitsorganisation sowie eine Initiative der International Union Against Cancer in Genf, an der ich persönlich beteiligt bin. Konkret wird etwa versucht, Politiker zu sensibilisieren und das medizinische Personal vor Ort zu schulen. Auch die Bevölkerung soll aufgeklärt und zur Teilnahme an Impfungen motiviert werden. Die Gates-Stiftung hat es ermöglicht, Impfungen kostenlos zu verabreichen. Ich weiß auch, dass die beiden Hersteller in gewissem Maße bereit sind, den Impfstoff an die eine oder andere Gruppierung nicht nur zum reduzierten Preis, sondern praktisch gratis weiterzugeben. Aber all das ist zugegebenermaßen leider nicht genug.

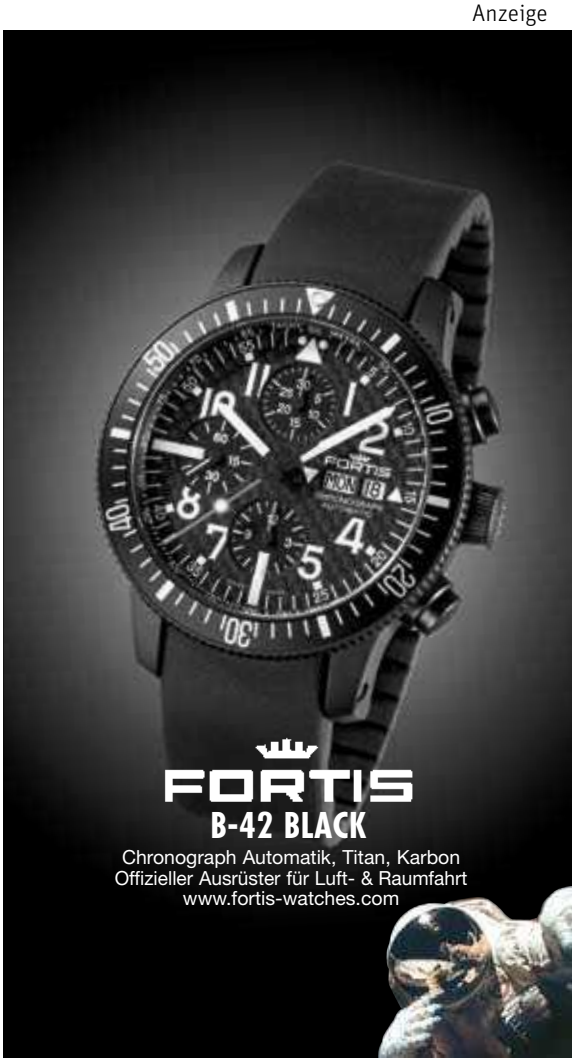
Spektrum: Mit Ihren Arbeiten über den Gebärmutterhalskrebs haben Sie bewiesen, dass es Viren gibt, die Krebs erzeugen. Anfangs schätzten Sie, dass solche Viren fünf Prozent aller Krebsfälle verursachen; später erhöhten Sie die Zahl auf 15 bis 20 und schließlich sogar auf bis zu 30 Prozent.

zur Hausen: Von 30 Prozent habe ich in dieser scharfen Form hoffentlich nie gesprochen … Was ich schon immer gesagt habe, ist, dass der Wert gut auf 20 Prozent gehen könnte. Heute lässt sich sehr gut belegen, dass 21 Prozent aller Krebserkrankungen mit Infektionen zusammenhängen.

Spektrum: Das ist eine überraschend genaue Zahl.

zur Hausen: Relativ genau, ja. Sie differiert etwas von der Zahl, die beispielsweise von der International Agency For Research On Cancer in Lyon genannt wird. Ich rechne ein, dass rund zehn Prozent der Magenkrebsfälle heute mit dem Epstein-Barr-Virus in Verbindung gebracht werden. Das sind sehr häufige Tumoren. Außerdem berücksichtige ich, dass etwa 25 bis 30 Prozent aller Mundhöhlen- und Rachenraumkrebse mit Hu-

Anzeige



manen Papillom-Viren – den gleichen wie im Genitalbereich – assoziiert sind. Auch diese Tumoren sind global nicht selten. Insofern kann ich die 21 Prozent mit gutem Gewissen vertreten. Wobei mit infektiösen Ereignissen nicht nur Viren, sondern auch Bakterien und Parasiten gemeint sind.

Spektrum: An welche Bakterien und Parasiten denken Sie?

zur Hausen: Unter den Bakterien ist vor allem *Helicobacter* als Verursacher von Magenkrebs zu nennen, unter den Parasiten *Schistosoma* als Auslöser von Blasenkrebs und eine chronische Leberegelinfektion als Ursache für Gallengangtumoren in Thailand und Südchina.

Spektrum: Gibt es Hinweise, dass auch häufigere Krebsarten mit Infektionen einhergehen?

zur Hausen: Kandidaten dafür sind meines Erachtens Krebserkrankungen des Blut bildenden Systems, also Leukämien und Lymphome. Möglicherweise haben jedoch auch andere Tumorarten – darunter so häufige wie Brust- oder Darmkrebs – etwas mit Infektionen zu tun. Ich behaupte das in erster Linie, um junge Menschen zu ermuntern, solche Fragen zu erforschen – nicht, weil ich bereits konkrete Belege dafür hätte. Bei Brust- oder Dickdarmkrebs kennen wir ja bereits viele Gene, die an der Entstehung beteiligt sind. Was man aber weniger weiß, ist, welches davon der Auslöser ist. Meines Erachtens lohnt es sich selbst bei denjenigen Krebsarten, die hinsichtlich ihrer genetischen Modifikationen schon sehr gut analysiert sind, auch noch einmal nach einer infektiösen Komponente zu forschen.

Spektrum: Krebs mit Infektionen in Verbindung zu bringen galt noch vor zwei, drei Jahrzehnten als völlig abwegiger Gedanke.

zur Hausen: Ja. Das Panorama hat sich deutlich gewandelt. Das ist heute kein Tabu mehr.

Spektrum: Sie gehörten schon in den 1970er Jahren zu den wenigen Wissenschaftlern, die dieses Feld intensiv beackerten. Und es heißt – auch in der offiziellen Begründung für den Nobelpreis –, Sie hätten das mit einer erstaunlichen Beharrlichkeit getan.

zur Hausen: Ja. Und es wird auch überall geschrieben, dass ich so fürchterlich hätte um Anerkennung kämpfen müssen. Das mit der Beharrlichkeit stimmt. Ich bin ein westfälischer Dickkopf. Und es ist sicherlich auch wahr, dass ich früher von dem einen oder anderen Kollegen ein spöttisches Lächeln geerntet habe. Aber im Großen und Ganzen fühlte ich mich anerkannt und nicht schlecht behandelt. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft beispielsweise hat mich von Anfang an großzügig unterstützt. Und meine Anträge sind ja stets von meinen Fachkollegen beurteilt worden. Mit anderen Worten: Die müssen sich positiv ausgesprochen haben.

Viele Darstellungen, die ich in der Presse lese, sind sicher gut gemeint, aber etwas überzogen. Jedenfalls ist es nicht so, dass ich als Einzelkämpfer einsam in der Gegend stand und trotzig meine Fahne hochhielt. Primär war ich daran interessiert, die Ursachen des Gebärmutterhalskrebses aufzuklären. Die Papillom-Viren haben sich dabei als goldene Spur erwiesen. Und die haben wir in der Tat mit großer Verve verfolgt.

Spektrum: Dennoch war es nicht einfach für Sie, einen finanzstarken Industriepartner zu finden, der Ihre Idee unterstützte, gegen Krebs zu impfen.

zur Hausen: Das war in den 1980er Jahren. Damals wussten wir schon, dass Gebärmutterhalskrebs von Papillom-Viren verursacht wird. Und da habe ich mich an die Industrie gewandt, weil es grundsätzlich naheliegt, einer viralen Erkrankung mit einem Impfstoff vorzubeugen, und weil es illusorisch ist, dass eine Institution wie das Krebsforschungszentrum die Entwicklung eines Impfstoffs finanziell stemmen kann. Ich habe verschiedene Unternehmen angesprochen und von der Firma Behring eine Anforderung erhalten. Eine Marktanalyse erbrachte dann aber, dass sich die Sache nicht lohne, ein Impfstoff würde sich nicht nennenswert verkaufen, und man hat die Sache fallen lassen. Das war eine totale Fehleinschätzung.

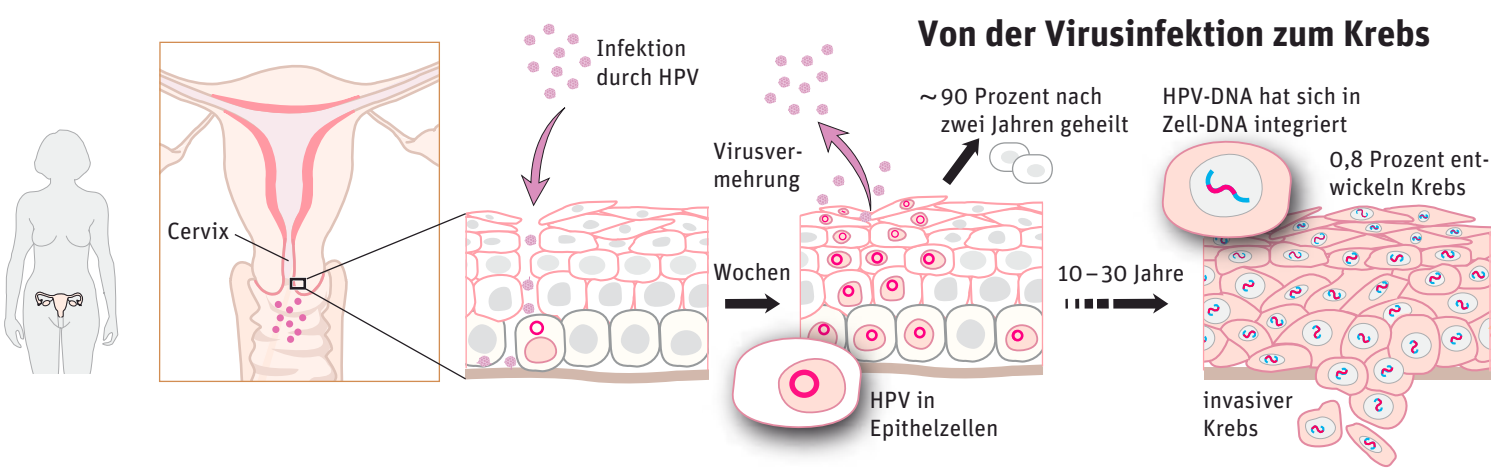
Spektrum: Dann hätte es den Impfstoff womöglich schon früher geben können?

zur Hausen: Ja, ich schätze drei, vier Jahre – mindestens.

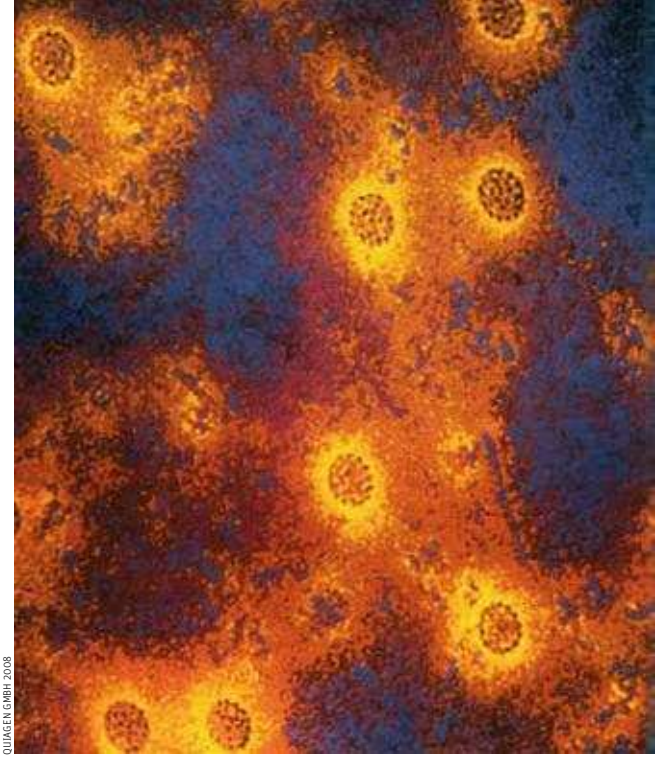
Spektrum: Nun waren Sie nicht nur Forscher, sondern als Vorstand des Deutschen Krebsforschungszentrums auch 20 Jahre lang Forschungsmanager. In dieser Funktion haben Sie stets versucht, eine engere Bindung zwischen der Grundlagenforschung und der Klinik herzustellen, damit die Erkenntnisse der Forscher den Patienten schneller zugutekommen. Ist das gelungen?

zur Hausen: Hier bei uns in Heidelberg ist die Zusammenarbeit zwischen For-

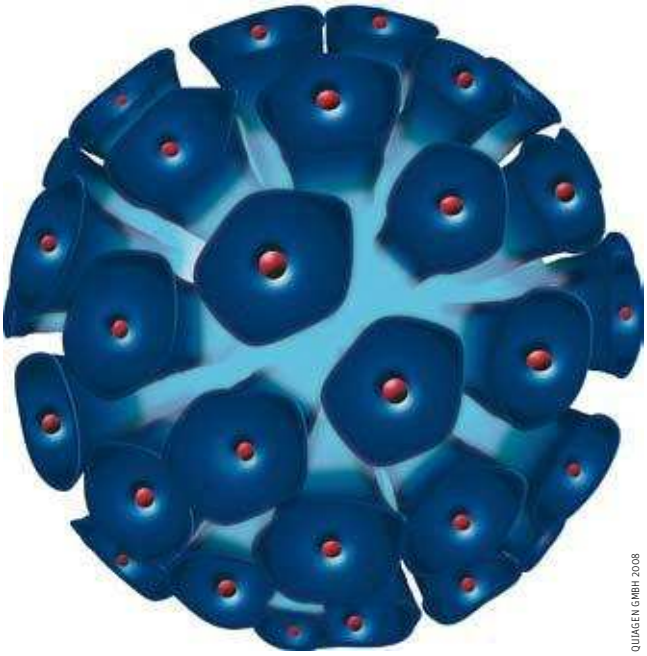
Das Humane Papillom-Virus (HPV) wird beim Geschlechtsverkehr übertragen und befällt Zellen in der Schleimhaut des Gebärmutterhalses (Cervix). Meist gelingt es dem Immunsystem, den Erreger zu beseitigen. In seltenen Fällen aber integriert er sich in das Erbgut der infizierten Zellen und kann so nach Jahrzehnten schließlich Krebs auslösen.



NOBEL COMMITTEE FOR PHYSIOLOGY OR MEDICINE, ANNIKA RÖHL



QUIAGEN GMBH 2008



QUIAGEN GMBH 2008

Im Humanen Papillom-Virus, hier in einer Falschfarbenaufnahme im Elektronenmikroskop (links) und in einem Modell (rechts) zu sehen, ist das DNA-Erbgut von einem Capsid mit turmartigen Ausstülpungen umgeben.

schung und Klinik sehr gut vorangekommen. Als ich 1983 hierherkam, war noch ein großes Misstrauen zwischen den ansässigen Kliniken und dem Krebsforschungszentrum spürbar. Erfreulicherweise hat sich das über die Jahre hinweg gelegt. Während meiner aktiven Amtszeit hatte ich noch das Glück, das Heidelberger Comprehensive Cancer Center durch die erste Begutachtung zu bringen. Das setzt ja auf eine enge Bindung von Forschung und Klinik und auf große Interdisziplinarität. Ich freue mich, dass es jetzt zu einer gut funktionierenden Einheit zusammenwächst.

Spektrum: Kommen die Vorteile einer engen Kooperation auch krebskranken Menschen außerhalb der Region zugute?

zur Hausen: Die Erkenntnis setzt sich generell durch, dass Forschung und Klinik enger zusammengehören. Bei mir lag der Gedanke vielleicht näher, weil ich von meiner Ausbildung her ja Mediziner bin und in meiner ganz frühen Berufszeit in Krankenhäusern gearbeitet habe. Damals konnte ich sehr gut beobachten, wie zwingend eine enge Verbindung zwischen beiden Bereichen ist.

Spektrum: In welchen Krankenhäusern waren Sie tätig?

zur Hausen: Ich war zwei Jahre als Medizinalassistent in Wimbern im Sauerland, in Isny im Allgäu und in meiner Heimatstadt Gelsenkirchen.

Spektrum: Und warum sind Sie nicht in der Klinik geblieben?

zur Hausen: Ich wollte die Approbation als Arzt haben. Und dafür musste ich diese klinische Zeit absolvieren. Tief im Herzen aber wollte ich stets wissenschaftlich arbeiten. Ich muss allerdings sagen, dass ich sehr gerne in der Klinik war. Ich konnte gut mit den Patienten umgehen, und ich kam gut bei den Patienten an. Also vermute ich mal, ich hätte auch Arzt werden können. Als ich danach in die Forschung ging, war ich zunächst enttäuscht. Das waren die ödesten Wochen meines Lebens. Man bekam keine vernünftige Anleitung, stand anfangs etwas hilflos im Labor herum und fragte sich: »Was soll ich hier?«

Spektrum: Aber auch da blieben Sie beharrlich.

zur Hausen: Eigentlich nicht. Ich war damals sogar ziemlich entschlossen, in die Klinik zurückzukehren. Aber dann kamen einige merkwürdige Dinge dazwischen. So hatte ich mich in der Kinderklinik in Freiburg beworben. Der dortige Chef bestellte mich ein. Doch als ich kam, hatte er den Termin vergessen. Ich bin daraufhin gleich weiter nach Basel gefahren, um mich dort unangemeldet vorzustellen. Aber der Chefarzt war an diesem Tag nicht da. Also weiter nach Bern. Dort habe ich mich beim Pförtner vorsichtig erkundigt, wie der Chef heißt, weil ich das nicht wusste. Dieser Chefarzt hat mich tatsächlich empfangen und sehr nett aufgenommen – und mir eine Stelle in Aussicht gestellt. Aus der ist dann aber doch nichts geworden. Unterdessen liefen die Arbeiten im Labor in Düsseldorf allmählich besser – und ich gewann meine Freude an der Forschung zurück.

Spektrum: Sie haben auch Biologie studiert.

zur Hausen: Ja. Sieben Semester lang, dann habe ich es aufgegeben. Ich wollte Biologie und Medizin parallel studieren, aber das war einfach nicht machbar. Vor allem vor dem Physikum hat es sich fast als katastrophal erwiesen, weil ich zu wenig medizinische Vorlesungen gehört hatte. Im fünften Semester, also zum Physikum hin, habe ich gearbeitet wie sonst nie mehr in meinem Leben, um das aufzuholen, was mir fehlte. Hinzu kam, dass der Biologieunterricht zu meiner Zeit an den Universitäten einfach schlecht war. Die junge, aufstrebende Molekularbiologie wurde praktisch überhaupt nicht gelehrt. Stattdessen mussten wir die Mundwerkzeuge von Insekten zeichnen. Nein, ich will mich nicht darüber lustig machen, auch das hat seine Berechtigung. Aber man ist auf diese Art doch an vielen Entwicklungen vorbeigegangen, die sich junge Wissenschaftler später, nach dem Studium, aneignen mussten.

Spektrum: In Ihrer ersten wissenschaftlichen Untersuchung haben Sie sich überraschenderweise mit Bohnerwachsen beschäftigt, einem Thema, das sich vordergründig weder biologisch noch medizinisch anhört.

zur Hausen: Sie meinen meine Dissertation über Bohnerwachse und inwieweit

sie Bakterien abtöten. Oh ja, dazu gibt es ein nette Anekdote. Es kam hier einmal eine Medizinerin zu Besuch, die gerade in Düsseldorf ihre Doktorarbeit machte und mir erzählte, sie sei in den Archiven auf meine Dissertation gestoßen. »Sie haben ja über Bohnerwachs promoviert«, sagte sie erstaunt, »Ich verspreche Ihnen – ich sage es ganz bestimmt niemandem weiter.« Ich antwortete ihr, dass sie das gerne jedem weitersagen könne. Da habe ich gar keine Bedenken. Zu dieser Doktorarbeit bin ich, sagen wir einmal, aus eher skurrilen Gründen gekommen. Auch ich fand das Thema zunächst extrem unattraktiv, aber insgesamt hat es sich dann doch als sehr interessant erwiesen.

Spektrum: Und was haben Sie herausgefunden?

zur Hausen: Dass bestimmte Bohnerwachse, wenn sie in Tuberkuloseheilstätten dem ultravioletten Licht ausgesetzt sind, Tuberkelbakterien abtöten. Es entstehen dann Sauerstoffradikale, die offenkundig die Abtötung bewirken. Also ich schäme mich in keiner Weise für diese Arbeit.

Spektrum: Wie sehen Sie die Zukunft der Krebsforschung und der Krebsmedizin?

zur Hausen: Die Forschung wird, wie bisher schon, langsam, aber stetig vorankommen. Vermutlich werden sich auch in der Therapie bestimmter Krebsarten weiterhin einige Verbesserungen erzielen lassen.

Spektrum: Kleine Fortschritte – kein Durchbruch?

zur Hausen: Also, wenn mich jemand fragen würde, ob ich glaube, dass der Krebs noch zu meinen Lebzeiten ausgerottet wird, kann ich ruhigen Gewissens antworten: mit Sicherheit nicht.

Claudia Eberhard-Metzger, die das Interview führte, ist freie Medizinjournalistin in Maikammer.

Harald zur Hausen: Infections Causing Human Cancer. Viley-VCH, Weinheim 2006.

HPV-Impfung: Gebärmutterhalskrebs vorbeugen. Eine Broschüre der Krebsgesellschaft Nordrhein-Westfalen e.V., Düsseldorf 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972382.

Springers Einwürfe

Ufos machen sich immer rarer

Erlahmt das Interesse der Außerirdischen an uns Erdlingen?

Leibhaftig ist mir zu meinem Leidwesen noch keine fliegende Untertasse erschienen, aber dank eines nun geöffneten Geheimarchivs des britischen Verteidigungsministeriums (http://ufos.nationalarchives.gov.uk/) konnte ich immerhin zahlreiche Ufo-Sichtungen überfliegen. Die Lektüre aller 4500 Seiten würde Auge und Hirn allerdings kaum weniger ermüden als nächtelanges Warten auf unidentifizierte Flugobjekte. So kann ich nur über Zufallsfunde berichten.

Was halten Sie von dem? Im Mai 1989 wurde ein Brite um drei Uhr nachts durch lautes Rumpeln – »wie von einer Eisenbahn« – aufgeschreckt und sah eine fliegende Untertasse landen; heraus stiegen zwei schwarz gekleidete Menschenähnliche, die sich in perfektem Englisch unterhielten und nach kurzer Reparatur wieder abflogen.

Ein weiteres Beispiel: Am 29. September 1992 saßen zwei Engländer nachts beim Angeln, als über ihren Köpfen bunte Lichter rasend über den Wolken spielten. Sie meldeten das Phänomen umgehend der British UFO Research Association (BUFORA) und füllten deren Formblatt penibel aus. Demnach war die Erscheinung optisch deutlich, aber völlig geruchlos. Die Frage, ob sie früher andere seltsame Erlebnisse gehabt hätten, bejahten die Angelfreunde: zwei Ufo-Sichtungen sowie Gedankenübertragung (*extrasensory perception*, ESP). Mit typisch britischem Humor überschrieb die BUFORA den Bericht mit »A Fisherman's Tale«, frei übersetzt: Anglerlatein.

Nur wenig später mahnte das Irish UFO Research Centre beim britischen Verteidigungsministerium an, man möge dort endlich von den »feindlichen grauen Wesen« *(hostile Greys)* Notiz nehmen, deren Existenz durch nicht näher beschriebene, wohl als bekannt vorausgesetzte »cyclonianische Monumente« hinreichend bewiesen sei.

Der Geheimbericht enthält jedoch nicht nur derlei Anekdoten, sondern auch eine Statistik, aus der hervorgeht, dass die Sichtungen tendenziell abnahmen: Waren es im Jahr 1978 noch 750, so liefen 1991 nur noch 117 Meldungen ein. Derzeit scheint das Verteidigungsministerium das Sammeln ganz eingestellt zu haben. Dabei müsste das Dokumentieren der Ufos, so es sie gäbe, eigentlich durch die enorm gestiegene Verbreitung von Camcordern und Kamera-Handys geradezu explodieren.

Das Ufo-Fieber begann offenbar in den 1950er Jahren und legte sich nach 1990; seinen Höhepunkt hatte es somit in der Ära des Kalten Kriegs. Furchtsam musterten die Menschen damals den Himmel; sie wussten, dass nuklear bestückte Bomber ständig in der Luft kreisten und Atomraketen abschussbereit in Erdsilos und U-Booten lauerten. Ich vermute, die Idee, überlegene Außerirdische würden die Erde beobachten und notfalls das Schlimmste verhüten, wirkte auf manche beruhigend. Andere sahen in jeder Leuchterscheinung eine sowjetische oder amerikanische Geheimwaffe.

Das Militär versuchte, sich diese Sorge zu Nutze zu machen: Man bediente sich der Ufo-Wächter als einer Freiwilligenarmee von Amateuren zur Luftraumüberwachung. In seinen freundlich-formellen Antwortbriefen betonte das Verteidigungsministerium stets, es untersuche Ufo-Phänomene nur unter dem Aspekt der nationalen Sicherheit. Doch anscheinend gab es in all den Jahren keinen einschlägigen Vorfall.

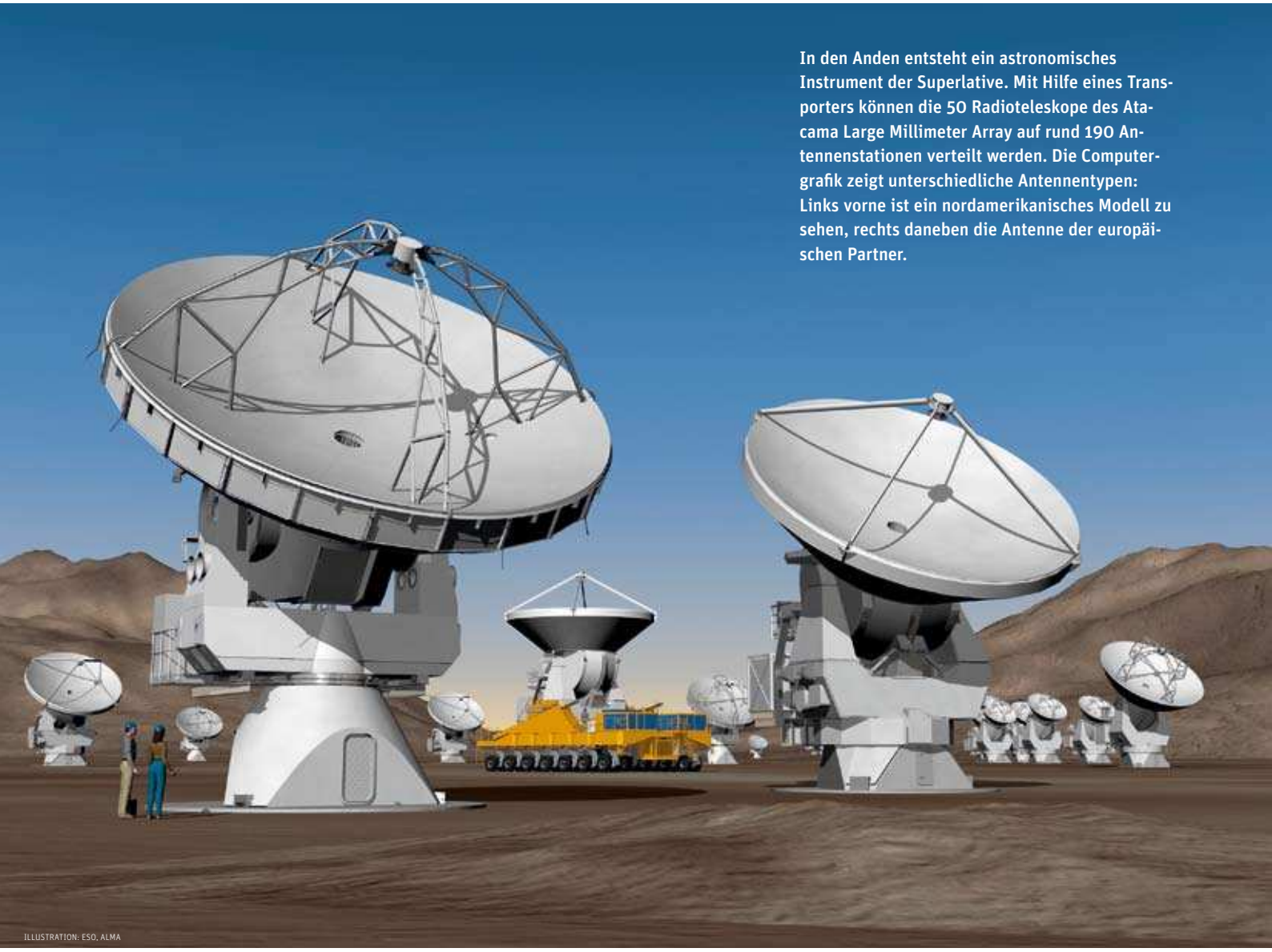
Michael Springer

Für hartnäckige Ufo-Gläubige beweist das freilich nur, dass avancierte Laserwaffen oder unheimliche Begegnungen der dritten Art weiter geheim gehalten werden – oder dass die Außerirdischen sich weniger für uns Erdlinge interessieren, seit wir einander nicht mehr so unmittelbar mit nuklearer Auslöschung bedrohen. Jedenfalls hat die Menschheit noch längst nicht alle Untertassen im Schrank.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

ALMAS TIEFER BLICK in kosmische Kreißsäle

Das neue Großteleskop ALMA verspricht detaillierte Erkenntnisse über die Entstehung von Galaxien, Sternen und Planeten. Die 50 Radioantennen auf einer Hochebene in Chile werden je nach Beobachtungswunsch neu angeordnet.



In den Anden entsteht ein astronomisches Instrument der Superlative. Mit Hilfe eines Transporters können die 50 Radioteleskope des Atacama Large Millimeter Array auf rund 190 Antennenstationen verteilt werden. Die Computergrafik zeigt unterschiedliche Antennentypen: Links vorne ist ein nordamerikanisches Modell zu sehen, rechts daneben die Antenne der europäischen Partner.

ILLUSTRATION: ESO, ALMA

LEONARD BURTSCHER

Vier Radioantennen warten auf der Basisstation bei San Pedro de Atacama in 2900 Meter Höhe auf den Transport zu ihrem endgültigen Standort.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Von Eva Schinnerer

Ein revolutionäres astronomisches Instrument entsteht in diesen Jahren in der Atacama-Wüste im Norden Chiles, etwa 300 Kilometer vom Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte entfernt. Sein wichtigstes Ziel: die Geburtsstätten von Sternen und Planeten in der Milchstraße ebenso wie ferne Galaxien des jungen Universums aufzuspüren und mit unerreichter Präzision zu untersuchen. Doch schon allein der Bau des Atacama Large Millimeter Array ist eine Herausforderung. Für ALMA müssen 50 je 115 Tonnen schwere Radioantennen – dieses Gewicht entspricht etwa dem zweier Boeing-737-Flugzeuge – auf die in 5000 Meter Höhe gelegene Chajnantor-Hochebene transportiert werden.

Derzeit findet man hier an manchen Tagen rund 450 Menschen bei der Arbeit. Auf einer Fläche von 250 Quadratkilometern errichten sie das ALMA-Kontrollzentrum und die Antennenstationen sowie die zugehörige Infrastruktur: Labors, Wohnräume und Straßen. Doch das Atmen in dieser Höhe fällt schwer. Zusammengebaut werden die Radioschüsseln mit ihren zwölf Meter Durchmesser daher in der Nähe des Ortes San Pedro. Hier, auf der Basisstation in »nur« 2900 Meter Höhe, wird man sie künftig auch warten. Eigens musste auch eine 43 Kilometer lange Schotterstraße gebaut werden, über die ein Transporter demnächst alle zwei Monate ein neues Exemplar auf die Hochebene schleppt.

Für das Projekt haben sich Europäer, vertreten durch die Europäische Südsternwarte (ESO), und Nordamerikaner, vertreten durch das National Radio Astronomy Observatory (NRAO), zusammengetan. Die ersten Beobachtungen sind voraussichtlich schon ab dem Jahr 2011 möglich, aber erst im Jahr 2013 wird das für 30 Jahre Betriebszeit ausgelegte ALMA voll einsatzfähig sein. Anfangs sind in den mannshohen Empfängerkammern, die sich unter jeder Hauptschüssel befinden, jeweils zwei Empfänger für insgesamt sechs Frequenzbereiche untergebracht. Im Lauf der Zeit wollen die japanischen und europäischen Kooperationspartner aber noch zusätzliche Empfänger für mindestens zwei weitere Bänder installieren.

Für die Zwecke der Forscher ist das riesige Interferometer ideal. Denn die Himmelsobjekte sind besonders in ihren frühen Entwicklungsstadien von viel Staub umgeben. Optischen Teleskopen ist die Sicht also durch kleinste Partikel von Silikaten, Graphit, Kohlendioxid- und Wassereis versperrt. Strahlung mit Wellenlängen im Submillimeter- und Millimeterbereich passiert den Staub jedoch mühelos. Beim Eintritt in die Erdatmosphäre stößt sie zwar auf Wasserdampf und wird, vor allem in unteren Luftschichten, teilweise absorbiert. Weil ALMA ebenso wie andere Millimeter-Instrumente in größtmöglicher Höhe betrieben wird, lässt sich dieses Problem aber teilweise umgehen.

Doch es genügt auch nicht, einfach eine Radioantenne auf einer Hochebene zu errichten. Zum Vergleich: Die vier großen Acht-Meter-Spiegel des VLT erreichen im nahen und mittleren Infraroten (also im Wellenlängenbereich zwischen 780 milliardstel Meter und etwa 10 Mikrometer) eine Auflösung von rund 50 Millibogensekunden. Strebt man dieselbe Auflösung bei Wellenlängen von einem Millimeter an, wie sie ALMA untersuchen

In Kürze

- Das revolutionäre Radiointerferometer Atacama Large Millimeter Array (ALMA) wird derzeit **auf 5000 Meter Höhe in den chilenischen Anden** errichtet. 2011 sollen die ersten Beobachtungen stattfinden, 2013 wird ALMA fertiggestellt.
- Das aus **50 miteinander verbundenen Radioantennen** bestehende Instrument wird Sterne und Galaxien aus der Frühzeit des Universums ebenso untersuchen können wie unsere kosmische Nachbarschaft.
- Weil je nach Größe der beobachteten Strukturen unterschiedliche Abstände zwischen den **115 Tonnen schweren Antennen** erforderlich sind, werden sie von Transportern je nach Wunsch der Astronomen auf einer Fläche mit einem Durchmesser von mindestens 15 Kilometern verteilt.

Die heutigen Radiointerferometer liefern nur einen Vorgeschmack auf das, was mit ALMA möglich sein wird

soll, bräuchte man eine Antenne mit einem Durchmesser von vier Kilometern! Denn die Winkelauflösung ist umgekehrt proportional zum Durchmesser des Teleskopspiegels und hängt außerdem von der beobachteten Wellenlänge ab.

Daher nutzen Radioastronomen das Prinzip der Interferometrie, um Radiostrahlung, deren Wellenlängenbereich zwischen weniger als einem Millimeter bis hin zu mehreren Metern liegt, mit vertretbarem Aufwand zu detektieren. Ein elektronisches Datenverarbeitungssystem, der Korrelator, wertet dabei die Laufzeitunterschiede der Signale einzelner Radioschüsseln aus. Im Fall von ALMA gelangen diese Signale über Glasfaserkabel ins Kontrollgebäude, wo sie dann in Echtzeit verarbeitet werden. Im einfachsten Fall, bei zwei verbundenen Antennen, wächst die so erzielte Auflösung mit dem Abstand der Antennen.

In Abhängigkeit von diesem Abstand erhalten die Forscher allerdings nur Information über räumliche Strukturen bestimmter Ausdehnung (in der Fachsprache Raumfrequenzen genannt): Je größer die Distanz zwischen zwei Antennen, desto kleinere Strukturen lassen sich untersuchen. Wollen die Wissenschaftler jedoch die Strukturen eines Objekts auf allen Skalen untersuchen – also ein vollständiges Abbild des Himmelsphänomens gewinnen –, müssen sie *alle* Raumfrequenzen erfassen.

Zum Teil hilft ihnen dabei die Erdrotation. Denn diese sorgt dafür, dass sich die Entfernung zwischen zwei Antennen – vom Himmelsobjekt aus gesehen – kontinuierlich ändert (ähnlich wie ein Bildschirm, vor dem man steht, schmaler zu werden scheint, während man sich seitlich von ihm wegbewegt). Zusätzlich aber schalten die Astronomen viele Einzelantennen zu einem Feld zusammen. In einem solchen *array* stehen dann zahlreiche unterschiedliche Antennenabstände (»Basislinien«) zur Verfügung.

Mit dieser Technik beobachten zum Beispiel die beiden erst jüngst aufgerüsteten Instrumente CARMA (Combined Array for Research in Millimeter-Wave Astronomy) in den Kalifornischen Inyo Mountains und das PdBI (Plateau de Bure Interferometer) in den französischen Alpen schon heute im Bereich von ein bis drei Millimetern. Ihre Basislinien von bis zu zwei Kilometer Länge liefern allerdings lediglich einen Vorgeschmack auf das, was mit ALMA möglich sein wird.

Seit 2003 wird auch das SMA (Sub-Millimeter Array) auf dem hawaiianischen Mauna Kea betrieben, das mit acht Radioteleskopen im Submillimeterbereich von 0,3 bis 1,7 Millimetern aktiv ist. Im Verbund mit weiteren Instrumenten kommt es auf immerhin bis zu rund 800 Meter große Antennenabstände.

Den derzeitige Rekordhalter übertrifft ALMA gleich mehrfach

Doch die Astronomen werden mit der Zeit immer anspruchsvoller und fordern nicht nur lange Basislinien, sondern je nach Beobachtungsvorhaben bestimmte Winkelauflösungen. Um so flexibel wie möglich zu sein, sind die ALMA-Antennen darum nicht fest installiert, sondern lassen sich zwischen rund 190 Stationen – die genaue Zahl steht noch nicht fest – verschieben. Während für das Very Large Array im US-amerikanischen Bundesstaat New

LAUFEN HEUTIGE STERNGEBURTEN ANDERS AB?

Insbesondere auch der Staubgehalt in Galaxien und seine Wärmestrahlung steht im Fokus der ALMA-Astronomen. Durch ihre Analysen wollen sie herausfinden, ob die physikalischen Umstände der **Sternentstehung in frühen Galaxien** tatsächlich den heutigen Bedingungen gleichen. Denn die Bildung von Metallen bei Supernovae und in sehr massereichen Sternen könnte damals einen größeren Einfluss auf Art und Menge junger Sterne gehabt haben, als Forscher bisher annehmen.

ILLUSTRATION: ESO, ALMA; FOTO OBEN: ESO, HANS HERMANN HEYER

Bald wird auf der Chajnantor-Hochebene (großes Bild) ein Array aus 50 Radioantennen errichtet sein. Ein Transportfahrzeug (kleines Bild, Vordergrund) wird die 115 Tonnen schweren Instrumente je nach Wunsch der Astronomen mit einer Geschwindigkeit von zwölf Kilometern pro Stunde von Station zu Station befördern und dort auf wenige zehntel Millimeter genau positionieren. In der weitläufigsten Konfiguration wird der größte Abstand zwischen zwei Antennen mindestens 15 Kilometer betragen.

Mexico – es umfasst 27 Radioantennen auf rund 2100 Meter Höhe – zu diesem Zweck Schienen verlegt wurden, ließen die ALMA-Verantwortlichen eigens einen Transporter entwickeln. Das 130 Tonnen schwere Gefährt, von denen zwei Exemplare gebaut wurden, befördert die Antennen mit einer Geschwindigkeit von bis zu zwölf Kilometern pro Stunde an beliebige der fest installierten Stationen.

Ist ALMA erst einmal fertig, wird das Instrument zehnmal mehr Basislinien als der heutige Rekordhalter CARMA besitzen und sie werden bis zu neunmal länger sein. Mit der Zahl seiner Antennen wird es das PdBI und das SMA um den Faktor acht übertreffen, seine Sammelfläche (und damit Empfindlichkeit) ist dann sechsmal höher als diejenige des derzeit leistungsstärksten Instruments, des PdBI. Und während die Sicht seiner Vorgänger auf helle Objekte wie die nächstgelegenen oder massereichsten Staubansammlungen beschränkt ist (siehe »Kosmischer Staub«, SdW 2/2001, S. 30), wird ALMA nicht nur Planetengeburten in der kosmischen Nachbarschaft, sondern auch fernste Galaxien aus der Frühzeit des Universums untersuchen – neben den bekannten Exemplaren vor allem auch ihre leuchtschwächeren Verwandten.

Hinzu kommt, dass mit ALMA erstmals auch Radioobjekte in der südlichen Hemisphäre detailliert in den Blick kommen. Trotzdem werden die heutigen Instrumente natürlich auch in Zukunft noch wertvolle Arbeit leisten: durch ihre Beobachtungen nördlicher Objekte ebenso wie als Prüfsteine für neue technologische Entwicklungen, die sich dann auch bei ALMA einsetzen lassen.

Während auf der Chajnantor-Ebene derzeit noch reges Treiben herrscht, wird während des eigentlichen Betriebs mehr Ruhe einkehren. Die Wissenschaftler selbst werden vor allem in Santiago de Chile stationiert sein und nur wochenweise zur Unterstützung der Beobachtungen nach San Pedro beziehungsweise direkt zu ALMA kommen – wenn sie überhaupt die Reise in die Anden auf sich nehmen. Denn die gewünschten Beobachtungsbedingungen, also wenig Wasserdampf, ruhige Atmosphäre und die geeignete Antennenkonfiguration, sind nicht auf Kommando abrufbar. Der Zeitraum, in dem die Beobachtungen durchgeführt werden, kann sich daher über Wochen oder Monate erstrecken, so dass ALMA als »Service«-Instrument konzipiert wurde: Ähnlich wie in den Kontrollräumen der Weltraumteleskope werden Techniker vor Ort das Interferometer gemäß den Wünschen der Forscher konfigurieren and betreiben.

Und das im 24-Stunden-Betrieb. Denn wie jedes Radioteleskop kann ALMA rund um die Uhr und an jedem Tag im Jahr beobachten. Gute Planung ist trotzdem nötig: Verlangen Beobachtungsprogramme eine hohe Winkel-

BEIDE FOTOS: ESO, ALMA / NRAO

Auf der Basisstation wird eine Antenne für die Montage vorbereitet (links). Der eigens entwickelte Transporter (rechts) wiegt selbst 130 Tonnen. Seinen Namen »Otto« verdankt er dem Besitzer der baden-württembergischen Fahrzeugfabrik, die das Gefährt entwickelte.

WAS GESCHIEHT RUND UM SCHWARZE LÖCHER?

Auch an aktive Galaxienkerne wird sich ALMA heranpirschen, in denen Schwarze Löcher unter enormem Energieausstoß Gaswolken und weitere Materie in ihrer Nähe verschlingen. Warum aber verlassen die Gasmoleküle überhaupt ihre Kreisbahn um das galaktische Zentrum und fallen stattdessen mitten hinein? Untersuchen lässt sich dies im benachbarten Virgo-Galaxienhaufen. ALMA wird bis auf wenige dutzend Astronomische Einheiten **an die Schwarzen Löcher »herankommen«**, die dort in aktiven Galaxien wie der elliptischen Riesengalaxie M 87 beheimatet sind. Das Interferometer ist sogar empfindlich genug, um dort einzelne Molekülwolkenkomplexe zu unterscheiden.

auflösung bei gleichzeitig kurzen Wellenlängen (beispielsweise bei 450 Mikrometer), sind beste Wetterbedingungen erforderlich. Kündigen sich diese an, müssen die Techniker schnell reagieren und den Ablauf der Beobachtungsprogramme den Wetterverhältnissen anpassen. Weniger empfindlich reagieren die Instrumente, wenn größere Wellenlängen von über einem Millimeter untersucht werden – dann beeinflusst auch ein höherer Wasserdampfgehalt der Atmosphäre die Messungen nicht wesentlich.

Deutlich länger sind die Vorlaufzeiten, wenn Forschungsvorhaben eine bestimmte räumliche Anordnung der Antennen benötigen. Der Durchmesser des Antennenareals, der je nach Konfiguration von 150 Metern bis hin zu 15, möglicherweise auch 18 Kilometer reichen soll, lässt sich nur nach und nach verändern. Werden durchschnittlich zwei Antennen pro Woche verschoben, wird es etwa ein halbes Jahr dauern, um von der kompaktesten zur weitläufigsten Konfiguration zu gelangen. Zusätzlich bedeutet dies aber auch, dass die Techniker die jeweiligen Antennen und Empfänger während des Betriebs neu kalibrieren müssen. Vor allem der Standort muss auf wenige Zehntelmillimeter genau bekannt sein.

Erste Pläne für ein großes Submillimeter-Array waren schon in den 1980er Jahren entstanden. Damals hatten sich Forscher in Europa, den USA und in Japan unabhängig voneinander an die Arbeit gemacht. Ernsthaft in Angriff genommen wurde ALMA aber erst Mitte der 1990er Jahre, als sich die europäischen und nordamerikanischen Wissenschaftler zusammentaten. Im Lauf dieses Prozesses wuchsen allerdings auch ihre Wünsche: In der nun geplanten Größe wird das Interferometer rund eine Milliarde US-Dollar kosten.

Schon von Anfang an hatten die Forscher auf Grund der hervorragenden Beobachtungsbedingungen einen Standort in den chilenischen Anden favorisiert. 1997 wählte das Planungsgremium dann die Chajnantor-Ebene aus, 1998 erklärte sie der damalige chilenische Präsident zur Science Reserve. Im Jahr 2002 gaben der US-Kongress und der Verwaltungsrat der Europäischen Südsternwarte (ESO) dann die Gelder für den Bau frei, so dass die gleichberechtigten Partner Europa und Nordamerika, sprich ESO und NRAO, das Projekt im November 2003 offiziell starten konnten. Im Juli 2006 beteiligten sich schließlich auch Japan und Taiwan als Juniorpartner.

Seither nimmt das Vorhaben immer konkretere Züge an. Die erste Antenne erreichte Chile im April 2007. Mittlerweile befinden sich schon sieben Antennen des amerikanischen Partners und vier japanische Exemplare im Aufbau. Ende 2008 wird auch die erste europäische Antenne erwartet. Und jüngst vermeldeten die Astronomen *»first fringes«*, also die ersten Interferenzmuster auf ihren Schirmen. Diese Premiere fand auf der Teststation in New Mexico statt, wo zwei ALMA-Antennen erfolgreich zusammengeschaltet worden waren.

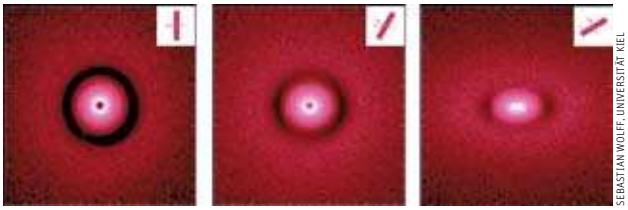
Das ganze Universum im Blick

Gemeinsam mit dem Array ACA (siehe Kasten rechts »Juniorpartner«) erfasst das hochflexible Instrument das kontinuierliche Spektrum ebenso wie Moleküllinien mit Bandbreiten von acht Gigahertz (Milliarden Hertz) bis etwa vier Kilohertz. So können die Astronomen praktisch alle astronomisch interessanten Objekte in den Fokus nehmen, Planeten und Kometen im Sonnensystem ebenso wie die ersten Sterne und Sternsysteme im

Wie entstehen Planeten?

Planeten wachsen in der Staubscheibe um Protosterne allmählich heran, indem sie bei ihren Umläufen Material aufsammeln. Ein junger jupiterähnlicher Planet dürfte so eine Lücke von ein bis zwei Astronomischen Einheiten Durchmesser reißen, die sich mit ALMA direkt abbilden lässt. Um dies in nahen Sternentstehungsgebieten etwa im Sternbild Taurus oder Hydra bei einer Wellenlänge von 0,8 Millimetern zu beobachten, genügt eine Auflösung von 35 Millibogensekunden. Den nötigen Antennenabstand von vier Kilometern erreicht ALMA mühelos. In den Simulationen ist rechts oben jeweils die Neigung der Bahnebene relativ zur (gestrichelten) Beobachterblickrichtung zu sehen.

Eine weitere indirekte Methode zum Nachweis von Planeten nutzt die Tatsache aus, dass sich der Schwerpunkt eines Sternsystems kontinuierlich leicht ändert, wenn Planeten darin ihr



SEBASTIAN WOLFF, UNIVERSITÄT KIEL

Zentralgestirn umkreisen. Um diese winzige Veränderung aufzuspüren, muss die absolute Sternposition am Himmel aber höchst genau bestimmt und über Jahre hinweg verfolgt werden. Forscher, die rund 1000 sonnenähnliche Sterne mit ALMA untersuchen wollen, müssten rund eine Woche Beobachtungszeit beantragen, verteilt über drei Jahre. Dabei würde vor allem der Staub um jüngere Sterne analysiert.

Universum. Auch detaillierte Studien von Regionen in unserer Milchstraße und nahen Galaxien wird das Interferometer erlauben, aber auch den Blick auf das interstellare Medium eröffnen, also auf Gas- und Staubwolken innerhalb von Galaxien (siehe »Das Gas zwischen den Sternen«, SdW 3/2002, S. 30).

Dort interessieren die Astronomen vor allem die Kühlungslinien der Gasmoleküle. Diese Linien in den gewonnenen Spektren entsprechen Energien, bei denen die Moleküle Strahlung emittieren und dadurch Energie verlieren, das Gas kühlt also ab. Sie verraten den Forschern nicht nur die physikalischen Eigenschaften des Gases wie Temperatur und Dichte, sondern auch dessen Kinematik. Bei ihren Beobachtungen werden sie ebenso auf Gasscheiben rund um werdende Sterne stoßen wie auf deren riesige Verwandten um supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentren naher Galaxien. Selbst »Details« wie die Staubhüllenreste von alternden Sternen oder den exakten Verlauf der Gasströmung innerhalb galaktischer Spiralarme werden die Daten enthüllen.

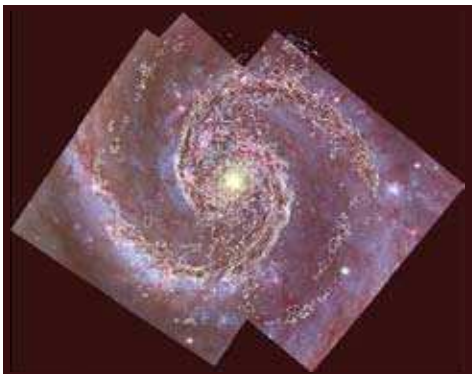
»Dabei sein«, wenn ein Stern zündet

Erstmals wird ALMA auch die Untersuchung der exakten Struktur einzelner Molekül- und Staubwolken mit durchschnittlichen Größen von einem Parsec ($3 \cdot 10^{16}$ Meter) erlauben. Wenn Teile solcher Gebilde unter dem Einfluss der Schwerkraft kollabieren, können daraus einzelne Sterne entstehen, solche wie unsere Sonne ebenso wie Exemplare mit zehn- bis hundertmal größeren Massen. Genauer beobachten lässt sich dieser Prozess, weil ALMA die Fragmentierung der Wolken auf Skalen von bis zu zehn Astronomischen Einheiten (eine AE ist der Abstand zwischen Erde und Sonne) sichtbar machen kann und die chemische Zusammensetzung der Objekte ermitteln hilft.

Insbesondere hoffen die Forscher, den Kollaps von kaltem Gas zu einem Protostern so-

Aufschlussreiche Molekülwolken

Beobachtungen der Verteilung molekularen Gases in nahen Galaxien werden mit ALMA zur Routine. Die Messung der Größe einzelner Molekülwolken, ihrer Bewegung in der Galaxienscheibe und ihrer Lage relativ zu nahen Sternentstehungsgebieten soll Aufschluss über Auslöser und Mechanismen für die Sternentstehung geben. Das Bild zeigt die Kohlenmonoxidverteilung in der Whirlpool-Galaxie M51 in einer Konturendarstellung. Unterlegt ist eine optische Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble.



SCHINNERER / OVRO / NASA / ESA, STSCI

Juniorpartner

Auch der Bau eines weiteren Bestandteils von ALMA, nämlich das von Japan und Taiwan beigesteuerte Atacama Compact Array (ACA), hat begonnen. Die zwölf Sieben-Meter-Schüsseln des ACA werden sich vergleichsweise eng zusammenstellen lassen, so dass sie ALMA vor allem bei Beobachtungen großskaliger Strukturen ergänzen. Dazu gehört zum Beispiel die **großflächige Verteilung der Molekülwolken** in den nahen Sternentstehungsgebieten des Carina-Nebels oder im Sternbild Perseus. ACA besteht darüber hinaus aus vier Zwölf-Meter-Antennen, die als Einzelteleskope genutzt werden. Sie liefern wichtige Kalibrationsmessungen für beide Arrays, lassen sich aber auch für die Untersuchung noch größerskaliger Strukturen wie der Spiralarme in unserer Nachbargalaxie Andromeda nutzen. Werden beide Interferometer gemeinsam betrieben, können sie auch komplex strukturierte Objekte wie die Spiralarme naher Galaxien optimal abbilden.

Was sich bislang nur in extremen Einzelfällen belegen ließ, wird ALMA anhand ganz normaler Galaxien überprüfen können

wie die anschließende Zündung seines Brennstoffs und sein Wachsen zu beobachten. Das ist allerdings nur indirekt möglich. Diese Prozesse gehen, auf astronomischen Zeitskalen gesehen, zwar ziemlich schnell vor sich und dauern beispielsweise bei massereichen Sternen deutlich weniger als eine Million Jahre. So viel Zeit haben irdische Beobachter aber trotzdem nicht. Wir müssen stattdessen eine Vielzahl von Objekten studieren, um einzelne davon in Zeitsequenzen einordnen zu können und aus dem Verhalten der Gesamtpopulation schlüssige Aussagen zu gewinnen.

Auch weitere zu lösende Rätsel existieren reichlich. So entstehen die meisten Sterne in den Spiralarmen der Milchstraße, doch gegenwärtige Theorien zur Frage, wo und wie genau dies geschieht, widersprechen einander (siehe »Sternentstehung in Spiralgalaxien», SdW 9/2000, S. 46). Ebenfalls zu klären wäre, inwieweit die chemische Zusammensetzung von Gaswolken die korrekte Bestimmung ihrer Masse beeinflusst.

In anderen Projekten wird ALMA weit in die Frühgeschichte des Kosmos blicken. Bei tiefen optischen Durchmusterungen des Himmels fanden Forscher heraus, dass die damalige Sterngeburtenrate diejenige, die wir heute im lokalen Universum beobachten, um ein Vielfaches übertrifft. Einige Milliarden Jahre nach dem Urknall aber, als das Universum etwa halb so alt wie heute war, begann die Zahl der neu hinzukommenden Sonnen kontinuierlich abzunehmen. Frühe Galaxien dürften also, so vermuten die Theoretiker, über wesentlich mehr molekulares Gas als Grundstoff für die Sternentstehung verfügt haben.

»Erwarte das Unerwartete!«

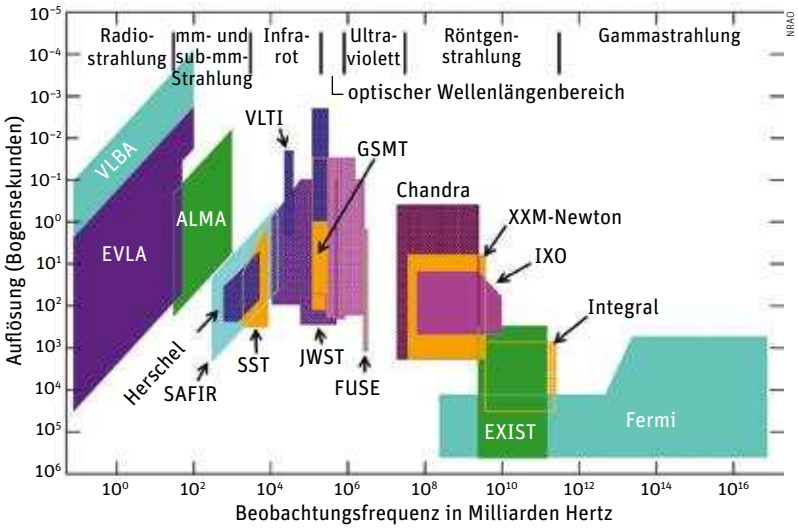
Belegen ließ sich dies bislang allerdings nur in besonderen Einzelfällen, etwa bei extremen Starburstgalaxien, die tausendfach mehr Sterne hervorbringen als gewöhnliche Galaxien, weil die Sternentstehung beispielsweise durch Galaxienkollisionen angeregt wurde (siehe »Galaxien im Ausnahmezustand«, SdW 9/2003, S. 38). Dank ALMA wird man diese Theorie erstmals auch anhand normaler Sternsysteme wie unserer Milchstraße überprüfen können.

Eine Lücke für ALMA

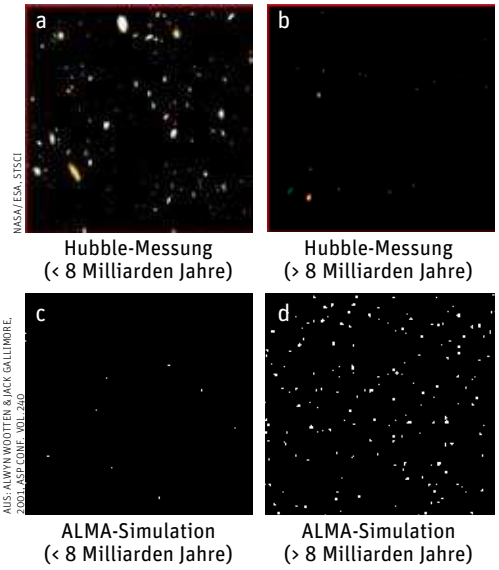
ALMA füllt einen weiteren »weißen Fleck« auf der Himmelskarte. Denn das Radiointerferometer deckt einen großen Bereich an Kombinationen von Beobachtungsfrequenzen bei bestimmten Auflösungen ab, der sich bisher noch nicht untersuchen ließ. Außerdem übertrifft die Empfindlichkeit von ALMA diejenigen heutiger Millimeter-Interferometer um fast eine Größenordnung.

Die Grafik stellt das Leistungsvermögen von ALMA in einen Zusammenhang mit den Fähigkeiten anderer großer Teleskope, ob bodenbasiert oder im Weltraum stationiert. Die hier genannten Instrumente sind in unterschiedlichen Entwicklungsphasen, manche haben bereits ihr Betriebsende erreicht, für andere wird erst das Konzept erarbeitet (siehe rechte Spalte).

ABKÜRZUNGEN (SPALTE RECHTS):
ESO: EUROPÄISCHE SÜDSTERNWARTE
ESA: EUROPÄISCHE WELTRAUMBEHÖRDE
NASA: US-RAUMFAHRTBEHÖRDE



Chandra: Weltraum-Röntgenteleskop (Teil des »Great Observatory Program« der NASA, seit 1999 im Orbit)
EVLA: Radiointerferometer, umfassende Modernisierung des Very Large Array (im Bau, USA)
EXIST: Weltraumobservatorium für harte Röntgenstrahlen (NASA, Konzeptphase)
FUSE: spektroskopische Weltraummission für das ferne Infrarot (NASA, seit 2007 beendet)
Fermi: (zuvor Glast) Weltraumteleskop für Gammastrahlung (NASA, seit 2008)
GSMT: optisches 30-Meter-Teleskop aus der Klasse der Extremely Large Telescopes mit mehr als 20 Meter Spiegeldurchmesser (USA, Konzeptphase)
Herschel: Weltraumteleskop für Infrarotstrahlung (ESA, Start 2009)
HST: (Hubble Space Telescope) Weltraumteleskop für sichtbare, ultraviolette und infrarote Wellenlängen (ESA/NASA, Teil des »Great Observatory Program«, seit 1990)
Integral: Weltraum-Gammaobservatorium (ESA, seit 2002)
IXO: (Verschmelzung von XEUS und Con-X) spektroskopisches Weltraum-Röntgenobservatorium (NASA/ESA, Konzeptphase)
JWST: (James Webb Space Telescope) Infrarot-Weltraumteleskop, oft als Hubble-Nachfolger bezeichnet (NASA/ESA, geplant für 2013)
SAFIR: Weltraumteleskop für das ferne Infrarot, möglicher Nachfolger für SST und Herschel (NASA, Konzeptphase)
SST: (Spitzer Space Telescope) Infrarot-Weltraumteleskop (Teil des »Great Observatory Program« der NASA, seit 2003)
VLBA: Radiointerferometer (USA, seit 1993)
VLTI: interferometrisches Teleskop für infrarote und optische Wellenlängen (ESO, seit 2001)
XMM-Newton: Weltraum-Röntgenobservatorium (ESA, seit 1999)



Das Hubble-Weltraumteleskop entdeckt vor allem Galaxien, die vor weniger als acht Milliarden Jahren entstanden (a). Objekte, die sich noch früher bildeten (b), findet das optische Instrument kaum. ALMA-Simulationen zeigen hingegen, dass das Interferometer insbesondere im jungen Kosmos häufiger fündig wird (d). Denn die Wärmestrahlung weit entfernter Galaxien verschiebt sich bei ihrer Reise durch das expandierende Universum in genau den Wellenlängenbereich, der von ALMA optimal detektiert wird.

Doch selbst damit ist das Spektrum des neuen Instruments noch lange nicht abgedeckt. Das Interferometer wird auch Aufschluss darüber geben, ob sich die Feinstrukturkonstante – und mit ihr möglicherweise elementare Größen wie die Lichtgeschwindigkeit oder die Ladung des Elektrons – im Lauf der kosmischen Evolution geändert hat. Und es kann unser Verständnis darüber erweitern, wie die kosmische Hintergrundstrahlung durch das heiße Gas in fernen Galaxienhaufen absorbiert und damit gekühlt wird (siehe «Veränderliche Naturkonstanten«, SdW 10/2005, S. 78 und »Auf der Spur der Sterngreise«, SdW 9/2008, S. 24).

Doch für neue Erkenntnisse müssen wir nicht immer in die Ferne schweifen. Natürlich wird ALMA auch Details unseres eigenen Planetensystems, etwa den Aufbau der Planeten und Monde und die Struktur ihrer Atmosphären, enthüllen. Weil das Interferometer viele verschiedene Moleküle zu beobachten erlaubt – darunter Sauerstoff, Ozon, Wasserstoffperoxid, halbschweres Wasser (HDO), Zyanwasserstoff, Chlorwasserstoff, Kohlenmonoxid, Methylzyanid und Stickstoffmonoxid –, werden wir mit seiner Hilfe genaue Auskunft über die chemische Zusammensetzung der Planetenatmosphären und ihre Dichtestruktur als Funktion der Höhe gewinnen. Selbst Rückschlüsse auf Winde und eventuelle Jahreszeiten werden die Sonnensystemforscher ziehen können.

Letztlich aber bedeutet der Quantensprung in Auflösung, Empfindlichkeit und Abdeckung von Wellenlängenbereichen, den ALMA vollzieht, dass uns auch völlig neue Dimensionen eröffnet werden könnten. Wenn das Interferometer endlich an den Start geht, wird es unter den Forschern vor allem auch heißen: »Erwarte das Unerwartete!« ◁

Eva Schinnerer forscht am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie. Zu ihren Arbeitsgebieten gehören Sternentstehungsprozesse außerhalb der Milchstraße, die Dynamik von Gas, das in aktive galaktische Kerne stürzt, sowie interferometrische Beobachtungsprojekte etwa am Very Large Array und am Plateau de Bure Interferometer. Sie wird zu den Wissenschaftlern gehören, die ALMA für Beobachtungen nutzen können.

Keller, H.-U.: Staub im Weltall. In: Sterne und Weltraum, S. 44, 3/2008.

Rohlfs, K., Wilson, T. L.: Tools of Radio Astronomy. Springer, Berlin, Heidelberg 2006.

Beuther, H.: »Das Submillimeter-Array auf dem Mauna Kea«. In: Sterne und Weltraum, S. 36, 3/2004.

ALMA-Homepage: www.almaobservatory.org

Wissenschaftliche ALMA-Projekte mit hoher Priorität: www.eso.org/sci/facilities/alma/science/drsp

ALMA-Animationen: www.alma.cl/alma_board/

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972369.

wichtige**online**adressen

Brainlogs
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

Ingwer und Meerrettich
zur wirkungsvollen Entzündungshemmung bzw. Antibiose bei Pferd und Mensch
www.freenet-homepage.de/Brosig-Pferde-Ingwer/

Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

KOSMOpod
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

WISSENSlogs
Science unplugged
www.wissenslogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

Die Suche nach dem FEHLENDEN SPIN

Von Protonen hängt unsere Existenz ab: Ohne sie gäbe es weder Galaxien noch Leben. Wissenschaftlern aber bereiten sie Kopfzerbrechen. Denn noch ist völlig unklar, wie sich eine ihrer wichtigsten Eigenschaften, der Spin, aus den Vorgängen in ihrem Inneren erklären lässt.

In Kürze

- Anders als die fundamentalen Elektronen sind Protonen **Teilchen mit einer hochkomplexen Struktur**. Wie Kreisel besitzen sie einen Drall oder Spin, der makroskopisch vielfach in Erscheinung tritt. Er lässt sich in Kernspintomografen nutzen, dominiert aber auch Phänomene wie das Bose-Einstein-Kondensat.
- Wie sich **der Spin** aus den Bestandteilen des Protons – den Quarks und Gluonen – zusammensetzt, ist jedoch noch weit gehend ungeklärt.
- Nach jahrzehntelangen Forschungen versprechen neue Experimente eine **Lösung dieses Spin-Rätsels**. Wissenschaftler vermuten, dass er sich teilweise von den Quarks entkoppelt und über das ganze Nukleon »verschmiert«.

Von Steven D. Bass und Gerhard Samulat

An und für sich ist die Welt ganz einfach konstruiert. Bis auf einige exotische Partikel besteht der weitaus überwiegende Teil des sichtbaren Universums aus nur drei Teilchen: aus Protonen und Neutronen, also den Bausteinen des Atomkerns, sowie aus Elektronen. Das gilt für interstellares Gas ebenso wie für die unzähligen Galaxien mit ihren Myriaden von Sonnen und deren Planeten. Während Elektronen als elementar gelten – zumindest fand kein Experiment auf der Welt bislang Hinweise auf einen inneren Aufbau der negativ geladenen Partikel –, sind die Kernbausteine hoch komplex strukturiert.

Protonen und Neutronen, die auch als Nukleonen bezeichnet werden, bestehen im Wesentlichen aus jeweils drei Valenzquarks. Im Fall des Protons sind dies zwei up-Quarks und ein down-Quark, bei Neutronen ist es umgekehrt. Zusammengehalten werden die Quarks durch eine der vier Grundkräfte der Natur, die starke Kernkraft. Messungen an leistungsstarken Beschleunigern – durchgeführt etwa vom europäischen Teilchenforschungszentrum (CERN) bei Genf, dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg, dem Jefferson Laboratory in Virginia, dem Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in Kalifornien oder dem Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) am Brookhaven National Laboratory bei New York –, zeigen jedoch, dass Protonen und Neutronen nicht nur aus den Valenzquarks bestehen, sondern dass in ihnen auch eine »Suppe« aus virtuellen Teilchen schwappt.

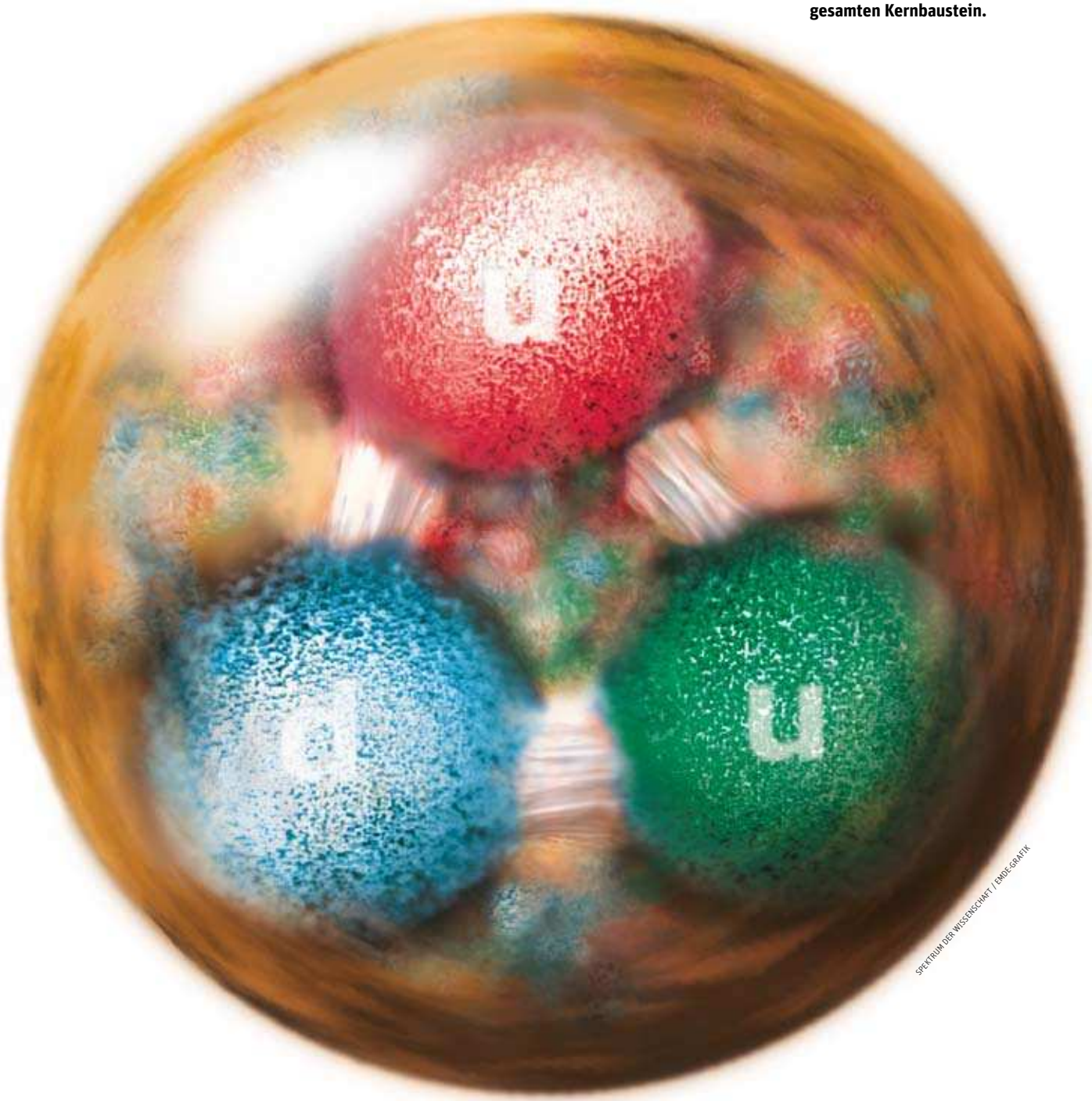
Die Lebensdauer dieser flüchtigen Teilchen, die gewissermaßen aus dem Nichts entstehen, ist durch die heisenbergsche Unschärferelation begrenzt und meistens äußerst kurz. Trotzdem spielen sie eine wichtige Rolle, allen voran die Gluonen: Sie vermitteln die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks und halten auch die Kernbausteine und damit letztlich den Atomkern zusammen. Außerdem finden sich in der Nukleonensuppe zusätzliche Quarks und deren Antiteilchen: Neben weiteren up- und down-Quarks, so genannten Quarks der ersten Generation, blitzen hier auch immer wieder Vertreter höherer Elementarteilchengenerationen auf.

Überraschende Gemeinsamkeit grundverschiedener Partikel

Das Verblüffende: Sowohl die als elementar angesehenen Elektronen als auch die hoch komplex aufgebauten Protonen und Neutronen rotieren in exakt gleicher Weise um sich selbst. Sie besitzen mit anderen Worten genau den gleichen Eigendrehimpuls, nämlich 1/2 ħ. Der Wert dieses so genannten Spins wird in Fachkreisen in Vielfachen des planckschen Wirkungsquantums $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Joulesekunden, dividiert durch 2π, angegeben. Als Abkürzung für diese Basiseinheit des Spins hat sich $\hbar = h/2\pi$ eingebürgert, gesprochen »h-quer«.

1/2 ħ stellt gleichzeitig den kleinsten quantenmechanisch erlaubten Wert dar, zumindest wenn man Kombinationen paralleler und antiparalleler Spins außer Acht lässt sowie den Spin null des hypothetischen Higgs-Bosons. Nach ihm fahnden Physiker auf der ganzen Welt seit Jahren, weil es dafür verantwortlich

Je tiefer der Blick ins Innere des Protons, desto komplizierter die Verhältnisse: Die Eigenschaften der drei Valenzquarks, aus denen es sich zusammensetzt (zwei up-Quarks und ein down-Quark), sind nicht mehr fest an »ihre« Teilchen gebunden, sondern »verschmieren« über den gesamten Kernbaustein.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

In einer bahnbrechenden Arbeit hatte Dirac erkannt, dass der Elektronenspin auf natürlichem Weg aus spezieller Relativitätstheorie und Quantenmechanik hervorgeht

gemacht wird, dass alle anderen Bausteine der Materie eine Masse besitzen (siehe »Das Geheimnis der Masse«, SdW 2/2006, S. 36).

Anders als bei Elektronen ergibt sich der Spin der Protonen und Neutronen nun aus dem komplexen Zusammenspiel der Eigendrehimpulse der Valenzquarks, der virtuellen Gluonen und der Quark-Antiquark-Paare der Nukleonensuppe. Weitere Beiträge stammen von den Bahndrehimpulsen der jeweiligen Partikel.

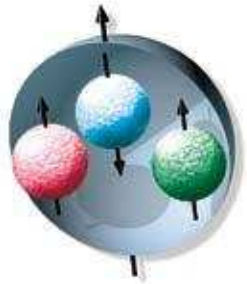
Der Spin sorgt für den großen Unterschied

Eingeführt wurde das Konzept des Eigendrehimpulses ursprünglich von den niederländischen Physikern Samuel A. Goudsmit (1902–1978) und George E. Uhlenbeck (1900–1988) im Jahr 1925. Sie konnten damit erklären, warum sich die Spektren wasserstoffartiger Atome, die einem Magnetfeld ausgesetzt sind, in feine Linien aufspalten. Je nach Orientierung der Elektronenspins besitzen die Systeme nämlich leicht unterschiedliche Energien.

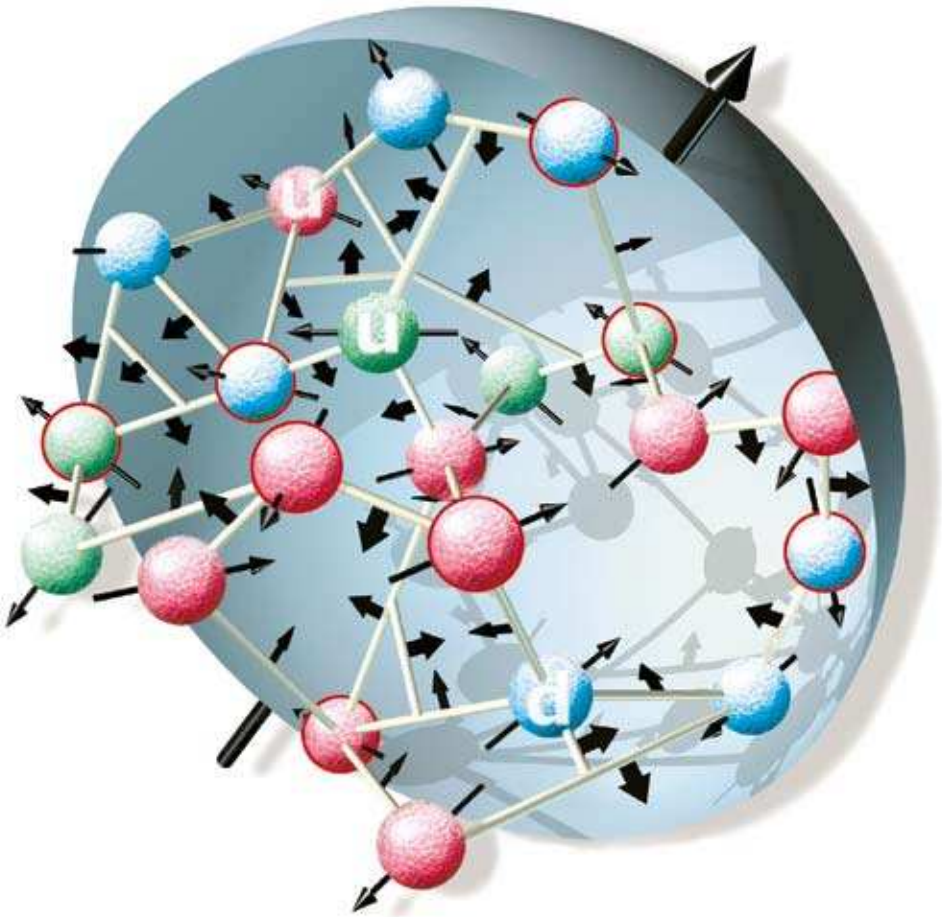
Derartige Experimente sowie spätere quantenmechanische Überlegungen belegten außerdem, dass die Materie aus zwei unterschiedlichen Arten von Teilchen aufgebaut ist. Dies sind zum einen die nach dem italienischen Physiker Enrico Fermi (1901–1954) benannten Fermionen. Sie besitzen stets einen halbzahligen Eigendrehimpuls, beispielsweise 1/2 ħ, 3/2 ħ, 5/2 ħ. Solche Teilchen gehorchen der nach Fermi und dem Briten Paul Adrien Maurice Dirac (1902–1984) benannten Fermi-Dirac-Statistik. In einer bahnbrechenden Arbeit hatte Dirac erkannt, dass der Spin der Elektronen sich als natürliche Konsequenz aus der richtigen Anwendung von Albert Einsteins (1879–1955) spezieller Relativitätstheorie auf die Quantenmechanik ergibt.

Die zweite grundlegende Teilchenart repräsentieren die Kraftaustauschteilchen. Diese nach dem indischen Physiker Satyendranath Bose (1894–1974) benannten Bosonen besitzen stets einen ganzzahligen Eigendrehimpuls. Zu ihnen gehören beispielsweise die Photonen – die Lichtteilchen also –, aber auch die Gluonen.

Beide Formen der Materie verhalten sich physikalisch recht unterschiedlich. Fermionen gehorchen dem nach Wolfgang Pauli (1900–1958) benannten Prinzip, wonach sie keinen gleichartigen Partner an dem Ort dulden, an dem sie sich gerade befinden. Stets müssen sich die Teilchen zumindest in einer quanten-



Proton



Die obige Grafik, in der sich der Spin dreier Quarks zum Gesamtspin 1/2 ħ des Protons addiert, erfasst die tatsächlichen Verhältnisse nur höchst ungenau. Ein detaillierterer Schnappschuss der Teilchen im Proton (rechts) wird der herrschenden Komplexität gerechter. Drei Valenzquarks (zwei up-Quarks und ein down-Quark) »schwimmen« in einer Nukleonensuppe, die unter anderem aus zahlreichen virtuellen Quark-Antiquark-Paaren besteht. Die weißen Stege illustrieren die durch Gluonen vermittelte gegenseitige Anziehung.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAFIK, NACH: SLIM FILMS

EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS, MARGRETHE BOHR COLLECTION, FOTO: ERIK GUSTAFSON

Manche Drehbewegungen lassen sich nur schwer erklären. Hier bewundern die Nobelpreisträger Wolfgang Pauli (links, 1954 in der schwedischen Universität Lund) und Niels Bohr einen Stehaufkreisel, der sich, auf seinem »dicken Bauch« gestartet, von allein auf den dünnen Stiel dreht. Auf einer Tagung hatte Bohr stundenlang mit anderen Forschern über das Phänomen diskutiert, bis er schließlich entnervt gesagt haben soll: »Was wollt ihr denn, es funktioniert doch!«

mechanischen Zustandsgröße unterscheiden. Bosonen hingegen sind deutlich geselliger. Im Extremfall bilden sie bei sehr tiefen Temperaturen sogar einen einheitlichen quantenmechanischen Zustand. In einem so genannten Bose-Einstein-Kondensat beispielsweise sind die Teilchen völlig ununterscheidbar (siehe »Bose-Einstein-Kondensat bei Zimmertemperatur«, SdW 4/2007, S. 22).

Wie die Spins von Teilchen aber zu Stande kommen, gibt den Forschern noch große Rätsel auf. Die fundamentalen, nicht mehr weiter strukturierten Leptonen entziehen sich wegen ihrer nicht messbaren Ausdehnung bislang ohnehin der Überprüfbarkeit. Zu ihnen gehören neben dem Elektron auch dessen schwerere Verwandte höherer Teilchengenerationen, das Myon und das Tauon, ebenso wie die nahezu masselosen Neutrinos und deren jeweilige Antiteilchen. Anders sieht es mit den Protonen und Neutronen aus. Mit immer leistungsstärkeren Teilchenbeschleunigern dringen Physiker daher immer tiefer ins Innere dieser Kernbausteine ein, um ihre Geheimnisse zu lüften.

Unerwartet in die »Spin-Krise«

Erste Messungen zur Struktur der Protonen nahmen Experimentatoren bereits in den 1960er Jahren am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) vor. In den 1970er Jahren und Anfang der 1980er Jahre folgten dort weitere Untersuchungen. Die Streuversuche zeigten zunächst die Ergebnisse, die von einem einfachen Protonmodell mit punktförmigen Quarks auch zu erwarten waren.

Aufsehen erregten dann vor gut zwanzig Jahren Messungen der European Muon Collaboration am Super-Proton-Synchrotron (SPS) des CERN. Mit Hilfe dieses Beschleunigers lenkten Experimentatoren einen Myonenstrahl auf eine Protonenprobe. Entscheidend war dabei die Polarisation, also die Ausrich-

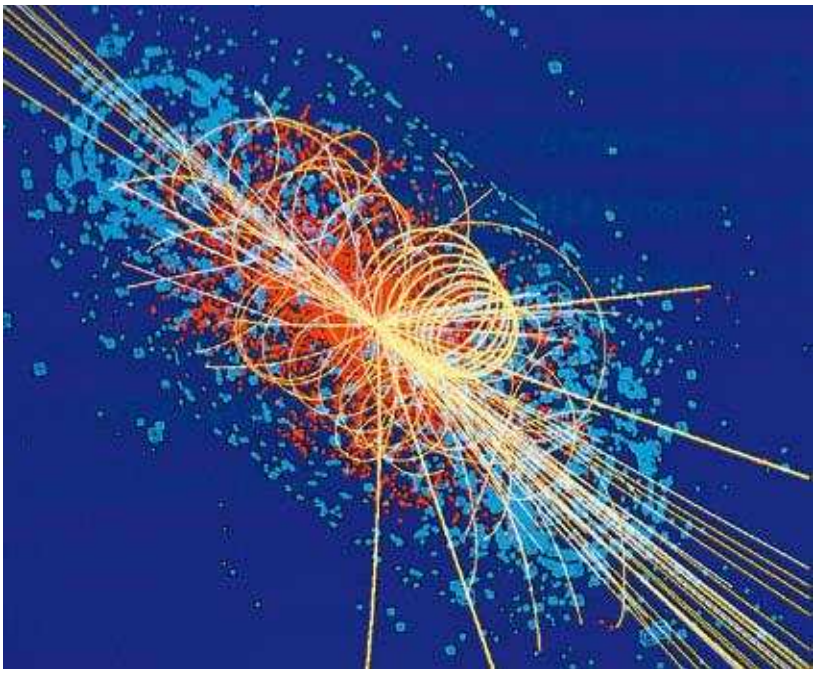
Nicht nur Theorie: der Spin in der Praxis

Die recht seltsamen Eigenschaften des Spins – der als Eigenrotation eines Teilchens nur notdürftig beschrieben ist und in unserer klassischen Welt keine Entsprechung hat – finden gleichwohl praktische Anwendung.

Weil mit dem Spin auch ein magnetisches Moment verbunden ist, richten sich Fermionen in Magnetfeldern wie Kompassnadeln aus. Diese Eigenschaft machen sich Ingenieure und Mediziner unter anderem in Kernspintomografen zu Nutze: Durch eine Kombination starker Magnete lassen sie die Spins von Protonen oder anderen Atomkernen in ihren Proben (oder Probanden!) wie Spielzeugkreisel hin- und herpendeln. Bei bestimmten Feldstärken, die von den Eigenschaften des jeweiligen Gewebes abhängen, schaukeln sich die Eigendrehimpulse der Kernbausteine resonanzartig auf und entziehen dem Feld messbar Energie. Durch Abtasten der Probe lassen sich darüber hinaus Ortsinformationen gewinnen und zum Beispiel Materialfehler in Festkörpern oder Hirnaktivitäten von Menschen bildlich darstellen.

Auch makroskopische Spin-Phänomene zeigen, dass der Spin nicht nur ein theoretisches Konzept der Quantenmechanik ist. Dazu gehört die Supraleitung, bei der in bestimmten Festkörpern zwei Fermionen – in diesem Fall Elektronen –, deren Spins antiparallel ausgerichtet sind, unterhalb einer materialabhängigen Sprungtemperatur aneinanderkoppeln. Ihre halbzahligen Spins addieren sich dann zu null, so dass sie als eine Art künstlicher Bosonen verlustfreien Stromtransport gestatten.

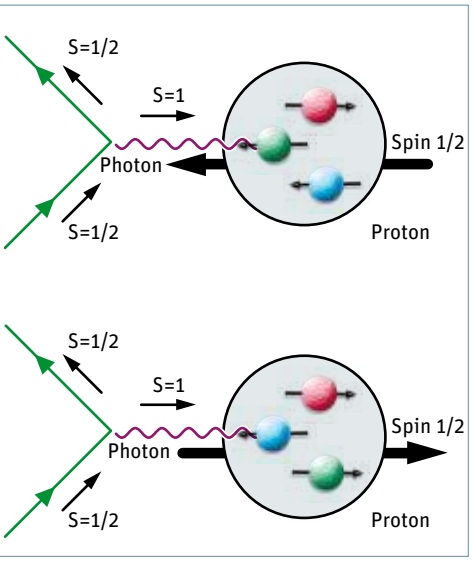
Darüber hinaus spielen Spins natürlich eine zentrale Rolle im Atom. Sie bestimmen nämlich, wie sich die Elektronen auf verschiedene Orbitale in Atomen oder Molekülen verteilen und legen so die Grundlage für die Chemie.



CERN

Der Zusammenstoß zweier Protonen, wie er an den Beschleunigern Large Hadron Collider (LHC) oder am RHIC herbeigeführt wird, führt zu unübersichtlichen Ergebnissen. Tatsächlich nämlich kollidieren ihre Bestandteile, die Quarks, miteinander. Abgebildet ist die Simulation eines vom CMS-Detektor des LHC registrierten Zusammenstoßes bei 14 Teraelektronvolt. Unter den Kollisionsprodukten finden sich allerdings keine einzelnen Quarks, denn ihre extrem starken gegenseitigen Anziehungskräfte lassen sie immer nur zu mehreren auftreten.

Das Prinzip der Vermessung von Quarks illustriert diese Grafik. Teilchen mit Spin 1/2 ħ (Elektronen oder Myonen; grüne Linie) wechselwirken über ein Photon mit Spin 1 mit Quarks in einem Proton, allerdings nur mit jenen, die entgegengesetzten Spin besitzen. Aus den – je nach Spinorientierung des Protons unterschiedlichen – Ablenkungswinkeln und Energieverlusten der Spin-1/2-Teilchen können die Forscher schließlich Information über die Spinausrichtung der Quarks gewinnen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

tung der Spins sowohl im Projektil als auch in der Probe. Mit Hilfe spezieller Magnete zwangen die Forscher die (mit dem Spin verknüpften) magnetischen Momente der Myonen in die gewünschte Vorzugsrichtung, sie waren also entweder parallel oder antiparallel zur Richtung des Myonenstrahls ausgerichtet. Entsprechend manipulierten sie auch die Spins der Probe.

Trifft ein anfliegendes Myon nun ein Proton, so tritt es mit ihm – genauer: mit einem der Quarks im Inneren des Protons – in elektromagnetische Wechselwirkung, indem es mit ihm ein energiereiches Photon austauscht. Dieses Austauschteilchen der elektromagnetischen Kraft ist ein Boson und besitzt den Spin 1 ħ. Weil der Drehimpuls eine Erhaltungsgröße ist, geht dieser Spin bei der Kollision auf das Quark über; er addiert sich zum Spin des Quarks, der plus oder minus 1/2 ħ betragen kann. Weil Quarks mit dem Eigendrehimpuls 3/2 ħ aber nicht existieren, wird das Photon nur von einem Quark mit entgegengesetztem Eigendrehimpuls, also minus 1/2 ħ aufgenommen.

Als die Experimentatoren Versuche mit parallel respektive antiparallel polarisierten Projektilen durchführten, erlaubten ihnen die jeweils unterschiedlichen Ergebnisse tiefe Einblicke in die Struktur der Protonen und Neutronen sowie in die Spinausrichtungen der Bausteine, die das Nukleon formen.

Es zeigte sich ein äußerst überraschendes Bild. Nach dem relativistischen Quarkmodell, das von Teilchenbewegungen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausgeht, vermuteten die Theoretiker, dass sich der Spin des Protons zu rund zwei Dritteln aus den Spins der drei Valenzquarks zusammensetzen sollte. Ein weiteres Drittel sollten die Bahndrehimpulse der jeweiligen Teilchen sowie die Bestandteile der Nukleonensuppe, also die virtuellen Quark-Antiquark-Paare und Gluonen beisteuern.

Doch die Wissenschaftler stellten fest, dass die Valenzquarks für gerade einmal rund 30 Prozent des Eigendrehimpulses der Nukleonen sorgen – das entspricht nur etwa der Hälfte des erwarteten Werts. Bis heute ist die Herkunft des dominanten Rests unbekannter Natur, anfänglich sprachen die Teilchenphysiker sogar von einer »Spin-Krise« (siehe »Der geheimnisvolle Spin des Nukleons«, SdW 9/1999, S. 28). Aber auch aktuelle Messungen der Compass-Kollaboration (Common Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) am CERN und an den RHIC-Experimenten Phenix (Pioneering High-Energy Nuclear Interaction Experiment) und Star (Solenoidal Tracker at RHIC) bestätigen die Diagnose. In diesen Anlagen lassen Teilchenphysiker unter anderem polarisierte Protonenstrahlen gegeneinanderprallen. (Hierbei kollidieren die aus Quarks und Gluonen zusammengesetzten Protonen allerdings mit ihresgleichen statt mit den elementaren Myonen, was physikalisch einen erheblichen Unterschied macht.)

Die Versuche deuten zudem darauf hin, dass selbst die Polarisation der Gluonen in der Nukleonensuppe viel zu klein zu sein scheint, um den fehlenden Spin der Protonen und Neutronen zu erklären. Ähnliches gilt für die Teilchen des virtuellen Quarksees, was beispielsweise die Hermes-Arbeitsgruppe an der

Hamburger Hadronen-Elektronen-Ring-Anlage (HERA) belegen konnte.

Alles deutet also darauf hin, dass das Geheimnis des fehlenden Spins doch bei den Valenzquarks zu suchen ist. Für dieses Rätsel gibt es nun einen Erklärungsansatz. Einer von uns, Steven D. Bass, macht das quantenchromodynamische Verhalten des Vakuums für die schwache Spinpolarisation der Valenzquarks verantwortlich. Was aber bedeutet das?

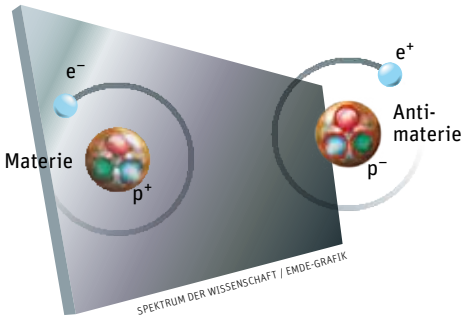
Ein See voller Möglichkeiten

Nach quantenmechanischer Vorstellung ist das (quantenelektrodynamische) Vakuum nicht absolut leer. Im Gegenteil. Physiker stellen sich das Nichts als »randvollen See« unendlich vieler Teilchen negativer Energie vor. Sie berufen sich damit auf Überlegungen des schon erwähnten Briten Dirac. Diese Teilchen besetzen alle möglichen negativen Energiezustände bis hin zur Oberfläche des Sees. Direkten Messungen entziehen sie sich aber, weil sie nicht in Erscheinung treten – schließlich haben in der realen Welt ausschließlich Korpuskel positiver Energie physikalische Bedeutung. Erst wenn man einem Teilchen aus den Tiefen des Dirac-Sees ausreichend Energie zuführt, tritt es aus der Oberfläche heraus und damit als messbares Objekt in Erscheinung.

Nichts anderes machen beispielsweise die Experimentatoren an Teilchenbeschleunigern: Sie baggern im übertragenen Sinn tief im Schlamm des Dirac-Sees, und je tiefer sie vordringen, desto seltsamere Partikel fördern sie zum Vorschein. Im See selbst bleibt an Stelle der Partikel dann eine Art Blase oder Loch zurück, das sich als so genanntes Antiteilchen interpretieren lässt. Es unterscheidet sich vom »gewöhnlichen« Teilchen im Wesentlichen durch seine entgegengesetzte Ladung. Dirac sagte seine Existenz 1928 voraus, und wenige Jahre später wies der Amerikaner Carl David Anderson (1905–1991) bei Versuchen mit kosmischer Strahlung auch tatsächlich Positronen nach, die positiv geladenen Antiteilchen der Elektronen.

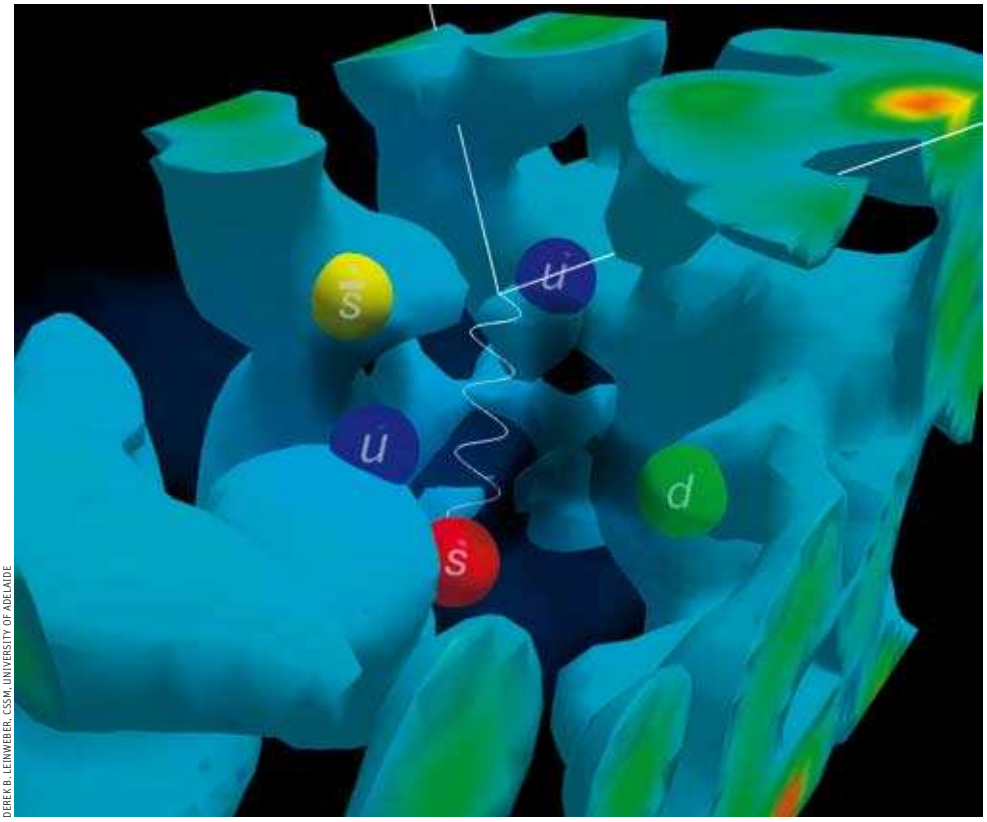
Die Theorie der Quantenchromodynamik (QCD), die das Zusammenspiel der stark wechselwirkenden Quarks und Gluonen beschreibt, weitet die Vorstellung eines Sees nun drastisch aus. Das quantenchromodynamische Vakuum besteht gleichsam aus einem »Ozean« unendlich vieler virtueller Quarks und Gluonen, deren Zustände sich quantenmechanisch überlagern. Das »QCD-Meer« besitzt zudem keine so glatte Oberfläche wie der Dirac-See, auf ihm existieren energetische Wellenberge und -täler.

In dieser Wasserlandschaft spielt sich nun das Geschehen innerhalb des Nukleons ab. Ein Valenzquark sucht sich in der Regel den Zustand niedrigster Energie, im Normalfall ein Wellental des quantenchromodynami-



e^- = Elektron
e^+ = Positron (Antielektron)
p^+ = Proton
p^- = Antiproton

»Gespiegelte« Materie: Antiteilchen unterscheiden sich von gewöhnlicher Materie durch ihre entgegengesetzte Ladung. Das Antiproton setzt sich aus Antiquarks zusammen.



DEREK B. LEINWEBER, CSSM, UNIVERSITY OF ADELAIDE

Gluonen lassen sich nicht nur als Teilchen, sondern auch als Feld (blau) interpretieren, wie diese Simulation zeigt. Das Gluonfeld hält die Quarks im Proton zusammen. Die Buchstaben kennzeichnen up-Quarks, down-Quarks und eine weitere Teilchensorte, die strange-Quarks. Die Struktur eines solchen Systems untersuchen Forscher unter anderem, indem sie es mit Elektronen beschießen (weiße Linie).

Der Spin verschmiert gleichsam im Proton – wie ein Stück Zucker, das in Wasser aufgelöst wird

schen Vakuums. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik kann das Teilchen aber mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch einen dieser Wellenberge hindurchtunneln (oder hindurchtauchen, um im Bild zu bleiben) und im Nachbartal auf ein virtuelles Quark-Antiquark-Paar treffen. Dessen Partner besitzen einander entgegengesetzte Spinausrichtungen. Zeigen nun der Spin des Valenzquarks und der Spin des Antiquarks in dieselbe Richtung, kommt es zur Annihilation, also zur gegenseitigen Vernichtung von Materie und Antimaterie, von Valenzquark und virtuellem Antiquark. Das virtuelle Quark, das übrig bleibt, besitzt dann aber einen Spin, der dem des ursprünglichen Valenzquarks entgegengesetzt ist!

Weil der Satz von der Drehimpulserhaltung gilt, muss die Differenz der beiden Zustände daher vom Vakuum aufgenommen werden. Ein Teil des Spins der sich bewegenden Quarks wird also unterdrückt beziehungsweise »sickert« in das quantenchromodynamische Vakuum hinein. Wissenschaftlicher ausgedrückt bildet sich durch die quantenchromodynamischen Fluktuationen in den Nukleonen eine Art spinpolarisiertes Kondensat aus – ähnlich einem Bose-Einstein-Kondensat aus Helium-3-Atomen –, das einen Teil des Spins aufnimmt und damit als Eigenschaft des gesamten Teilchens in Erscheinung tritt.

Damit aber lassen sich die Spins den Quarks nicht mehr eindeutig zuordnen, sie verschmieren gleichsam im Proton und werden so teilweise zu einer Eigenschaft des gesamten Kernbausteins – Bass vergleicht das mit einem Stück Zucker, das in einer Flüssigkeit aufgelöst wird. Dieser verschmierte Teil der Spins ist es also, der fehlt, wenn die Teilchen vermessen werden.

Des Rätsels mögliche Lösung vor dem Realitätstest

Man könnte sich das Proton daher auch als eine Art »Kugel« vorstellen, in der die Quarks moderat rotieren, was man als Ergebnis einer Messung der Spins einzelner Quarks in den Nukleonen erhielte. Innerhalb des Protons wirkt nun aber das starke quantenchromodynamische Vakuum und nimmt einen Teil der Spins der Quarks und Gluonen auf. Das bedeutet, dass sich die Kugel relativ zum quantenelektrodynamisch beherrschten Vakuum des Außenbereichs »dreht«. Die Überlagerung

Exklusiv für Abonnenten

Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer unter **www.spektrum-plus.de** Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:

Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Urwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg / Dynamikum, Science Center, Pirmasens

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie alles erwartet!

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

www.spektrum-plus.de

BROOKHAVEN NATIONAL LIBRARY

Ab 2009 prallen polarisierte Protonen im Schwerionenbeschleuniger RHIC (bei New York, im Hintergrund sind die Speicherringe zu sehen) mit um das 2,5-Fache erhöhter Energie aufeinander. Ziel ist, die Beiträge der Gluonen zum Protonenspin präziser zu messen.

beider Drehbewegungen – die des Protons (der Kugel!) und die der Quarks – ergeben den nach außen hin messbaren Gesamtdrehimpuls des Protons. Die Spin-Krise sagt uns demnach etwas über den Unterschied zwischen dem quantenelektromagnetischen und dem quantenchromodynamischen Vakuum.

Ob diese Vorstellung der Realität entspricht, müssen künftige Experimente zeigen. So soll am RHIC schon 2009 die Energie der Proton-Proton-Kollisionen von 200 Gigaelektronvolt (GeV, Milliarden Elektronvolt) auf 500 GeV mehr als verdoppelt werden, wodurch sich die Spinbeiträge der Gluonen deutlich präziser messen lassen. Auch die Polarisation der up- und down-Quarks und deren Antiquarks soll exakter bestimmt werden. Dazu werden die Forscher am RHIC gezielt W-Bosonen erzeugen, jene Teilchen also, die die schwache Wechselwirkung übertragen und bei der Umwandlung von Quarks in andere Quarks eine Rolle spielen.

Außerdem soll die Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF) an der amerikanischen Thomas Jefferson National Accelerator Facility ausgebaut werden. Mit der geplanten Endenergie des Beschleunigers von zwölf GeV – die Investitionen wurden erst jüngst genehmigt – lassen sich die Bahndrehimpulse der Valenzquarks, über die bislang sehr wenig bekannt ist, sowie deren Beiträge zum Spin des Protons voraussichtlich genauestens untersuchen.

Den Bahndrehimpulsen von Quarks und Gluonen wollen auch die Wissenschaftler der Compass-Gruppe am SPS auf die Schliche kommen. Daten werden seit vergangenem Jahr zwar nicht mehr erhoben, aber die Auswertung ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Zudem stehen demnächst wieder neue Experimente an.

Eine direkte Messung verschmierter Spins im quantenchromodynamischen Vakuum der Protonen ließe sich auch durch Streuversuche mit Neutrinos bewerkstelligen. Dass solche Teilchen mit Materie wechselwirken, ist allerdings extrem selten. Entsprechende Versuche sind daher noch Zukunftsmusik, wenngleich japanische Wissenschaftler die Möglichkeit solcher Kollisionen bereits prüfen.

Mit einem aber können wir fest rechnen. Jedes dieser Experimente wird helfen, das Zustandekommen des Spins der Nukleonen genauer zu verstehen und auf diese Weise unser Wissen um das komplexe Zusammenspiel der Urbausteine der Materie und damit die Grundlagen unserer Existenz zu erweitern. Was danach geschieht, bleibt offen: Ob wir dank unserer Entdeckungen kosmische Erscheinungen besser analysieren oder auch einfach nur eine neue Art von Kernspintomograf entwickeln können, steht bislang noch in den Sternen. ◁

Steven D. Bass forscht am Institut für Theoretische Physik der Universität Innsbruck über Quarks. Die Arbeit des »Spin-Doktors« und Kenners des europäischen Teilchenforschungszentrums CERN wird vom österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) unterstützt. Sein jüngstes Buch »The Spin Structure of the Proton« ist eine Zusammenschau des aktuellen Forschungsstands. **Gerhard Samulat** (rechts) forschte am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg und arbeitet heute als freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

Bass, S. D.: The Spin Structure of the Proton, World Scientific, Singapur 2008.

Bass, S. D.: How does the Proton spin? In: Science 315(5819), S. 1672 – 1673, März 2007.

Thomas, A. W., Weise, W.: The Structure of the Nucleon, Wiley-VCH, Berlin 2001.

Tomonaga, S.: The Story of Spin, University of Chicago Press, Chicago 1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972370.

ROTIERENDE BEZUGSSYSTEME

Coriolis – Schein oder Nichtschein?

West- oder Ostabweichung, Rosenlinien am Südpol? Kleine Effekte der Erddrehung kann man relativ einfach verstehen und berechnen.

Von Norbert Treitz

Wenn mitten in einem großen Schornstein oder dem Fallturm von Bremen ein Stein sich im freien Fall zu Boden bewegt, schlägt er dann genau unterhalb seines Startpunkts auf oder ein Stück westlich oder östlich? »Freier Fall« bedeutet eine Bewegung mit ruhendem Start und unter alleinigem Einfluss der Schwerkraft. Aber was heißt hier »ruhend«? Während der Stein fällt, dreht sich doch die Erde um sich selbst und läuft um die Sonne, von der Bewegung des Sonnensystems gegenüber den anderen Gestirnen ganz zu schweigen. Ich habe mich immer gefragt, wieso die »Zeitmaschine« von H. G. Wells ihren Ort relativ zum Straßenbelag beibehalten hat und nicht relativ zum Schwerpunkt der Erde oder dem des Sonnensystems, von der Drehung der Galaxis gar nicht zu reden!

Auch der Stein nimmt an der Erddrehung teil und ist deswegen, »von außen« gesehen, keineswegs in Ruhe, wenn er losgelassen wird. Bei einem Meteoriten aus dem Weltall ist das anders. Bis er auf die Erde auftrifft, hat er von all ihren Bewegungen noch nichts mitbekommen. Damit es einfacher ist, stellen wir uns vor, dass er genau auf den Erdmittelpunkt zurast und präzis die obere Öffnung des Turms trifft. Bis er auf dem Erdboden aufschlägt, hat sich die Erde mitsamt dem Turm auf ihr ein Stück nach Osten gedreht. Das wird dem Meteoriten dann als Westabweichung angekreidet.

Damit es noch einfacher ist, denken wir uns den Turm auf dem Äquator. Dann wandert er in einer Sekunde immerhin 465 Meter (Kasten links unten). Wenn der Turm 125 Meter hoch ist und der Meteorit die Durchschnittsgeschwindigkeit eines vom Turm fallenden Steins hätte – was für einen Meteoriten kläglich langsam wäre –, käme er reichlich 2,3 Kilometer vom Turm entfernt zu Boden (Kasten rechts unten).

Dass man davon beim Stein so gar nichts merkt, hat die Menschen vor 400 Jahren sehr an der Rotation der Erde zweifeln lassen. Wo bleibt denn der Fahrtwind?

Während wir oben auf dem Turm den Stein noch in der Hand halten, wandert er mit unseren 465 Meter pro Sekunde waagerecht wie der ganze Turm. Lassen wir ihn nun los, so starten wir »in Wirklichkeit« einen waagerechten Wurf mit dieser Startgeschwindigkeit. Im Bezugssystem des laufenden Turms fällt er also einfach senkrecht nach unten, oder?

Kleiner Effekt

Nicht ganz. Wir haben nämlich noch nicht beachtet, dass die Turmspitze etwas weiter vom Erdmittelpunkt entfernt ist als der Erdboden und deswegen auch eine etwas größere Bahngeschwindigkeit hat. Der Unterschied beträgt 9,13 Millimeter pro Sekunde. Der Stein bekommt diese höhere Anfangsgeschwindigkeit beim Start mit und eilt daher dem Erdboden geringfügig voraus, mit dem Effekt, dass er nach fünf Sekunden Fallzeit 45 Millimeter östlich von der Stelle aufschlägt, auf die ein Lot von der Startstelle aus zeigt: Ostabweichung.

Ist das nun die ganze Wahrheit, jedenfalls für die einfachen Verhältnisse am Äquator? Wenn man ganz pingelig ist, kann man ja einwenden: Während der fünf Sekunden hat sich die Erde um einen gewissen Winkel gedreht, und was vorher senkrecht war, ist um diesen Winkel verschieden von dem, was hinterher senkrecht ist, nämlich jetzt zum Erdmittelpunkt zeigt. Der Winkel ist mit großer Genauigkeit gleich dem Verhältnis aus den 2,3 Kilometer waagerechten Weges und dem Erdradius von 6367 Kilometern, also 0,00036.

Korrektur des kleinen Effekts

Setzen wir nun in den Bodenpunkt des Turms (dort, wo das Lot von der Abwurfstelle hinzeigt) den Ursprung unseres Koordinatensystems und lassen ihn mit der Erde mitwandern; allerdings soll das Koordinatensystem sich nicht mitdrehen, sondern die Orientierung vom Startzeitpunkt (die y-Achse zeigt nach oben) beibehalten. Dann zieht die Schwerkraft nicht nur nach unten, sondern auch ein bisschen – mit der Zeit zunehmend – nach hinten (Bild rechts oben). Genauer gesagt: Die Komponente der Fallbeschleunigung in negativer x-Richtung steigt linear mit dem Drehwinkel der Erde und damit auch mit der Zeit an, und zwar von 0 bis 3,6 mm/s^2 in den 5 Sekunden.

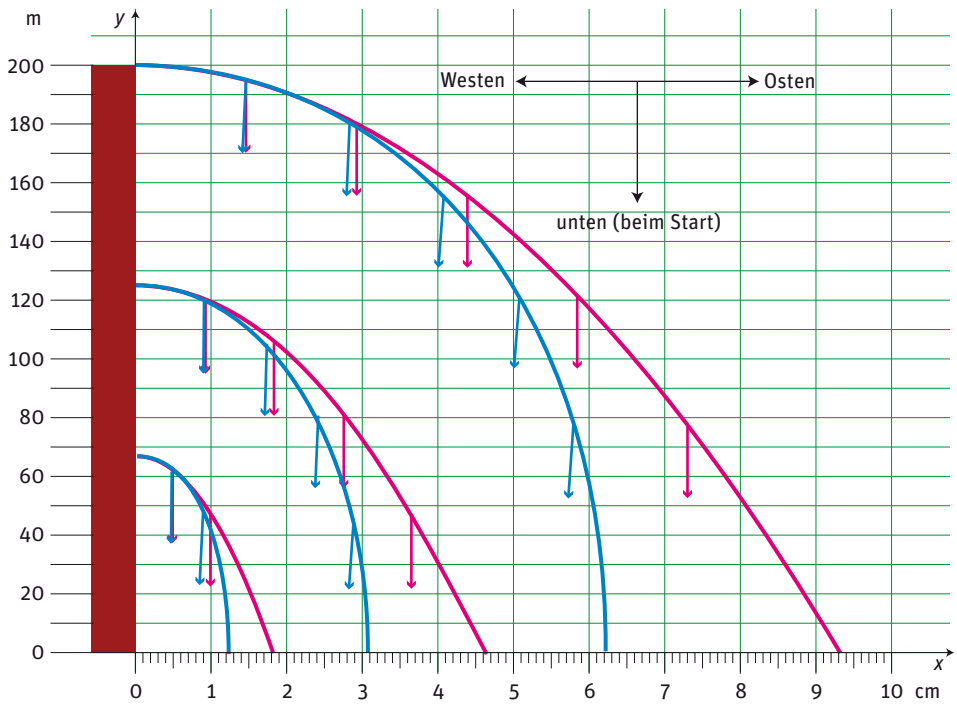
Diese Beschleunigung folgt also der Zeitabhängigkeit $\mathrm{d}a/\mathrm{d}t$ = 0,72 mm/s^3. Der Weg ergibt sich durch dreifache Integration über die Zeit: $a = t$ 0,72 mm/s, $v = t^2$ 0,36 mm/s^2 und $s = t^3$ 0,12 mm/s^3. Da alle Anfangswerte 0 sind, gibt das für die 5 Sekunden 15 Millimeter, die wir von der bisher berechneten Ostabweichung abziehen müssen.

Die Beachtung dieses Effekts nimmt dem unkorrigierten Wert 4,5 cm immerhin ein Drittel weg. Die Pingeligkeit hat sich also gelohnt, weil der ganze Effekt auch nicht viel größer ist.

Johann Friedrich Benzenberg (1777–1846), ein Schüler von Lichtenberg, hat 1802 durch Fallversuche aus 76 Meter Höhe im Turm von St. Michaelis in Hamburg die Ostabweichung nachge-

Die Erde ist schnell

Der Erdumfang am Äquator beträgt 40 076 Kilometer. Nach jeweils 86 164,099 Sekunden, einem »siderischen Tag«, hat die Erde wieder dieselbe Orientierung zum Fixsternhimmel. Das ergibt für einen Punkt auf dem Äquator, von einem mit dem Fixsternhimmel verbundenen Bezugssystem aus gesehen, eine Geschwindigkeit von 465 Meter pro Sekunde.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE, NACH NORBERT TREITZ

Ein Stein, der am Äquator fallen gelassen wird, folgt je nach Höhe einer der blauen Kurven. Wenn man nicht beachtet, dass sich während des Falls die Richtung der Fallbeschleunigung (Pfeile) dreht, überschätzt man die Ostabweichung um volle 50 Prozent (rote Kurven). Die blauen Kurven enden senkrecht und sind nahezu Viertelellipsen.

wiesen und damit einen Beweis für die Drehung der Erde erbracht (an der allerdings schon damals kein ernsthafter Zweifel mehr bestand).

Pendelversuche

Während der Ostabweichungsversuch von Benzenberg an den Polen gar nicht und am Äquator am besten funktioniert, ist es beim Foucault-Pendel gerade umgekehrt. Möglicherweise hat Vincenzo Viviani (1622–1703), neben Torricelli der berühmteste Schüler von Galilei, schon 1661 den Versuch ausgeführt, für den 190 Jahre später Léon Foucault (1819–1868) noch berühmter wurde.

In jedem größeren Physikmuseum gibt es ein Foucault-Pendel, das im Laufe der Öffnungszeit der Reihe nach Dutzende von Holzklötzchen auf dem Fußboden umwirft. Das sieht dann so aus, als drehte sich die Erde unter dem Pendel, aber nicht mit der wirklichen Winkelgeschwindigkeit der Erde, sondern mit einem kleineren Wert; man muss mit dem Sinus der geografischen Breite multiplizieren. Wir begeben uns deshalb wieder in Gedanken auf einen Pol, denn dort stimmt das mit der Drehung der Erde unter dem Pendel ganz wörtlich.

Auch in gemäßigten Breiten ist es nicht ganz einfach, ein Foucault-Pendel richtig aufzuhängen. Erstens muss es lange genug schwingen, um einen erheblichen Teil einer Erddrehung zu überdauern, zweitens darf es nicht über seine Aufhängung oder die Energienachfütterung an die Erddrehung gekoppelt sein. Es kann den Effekt bereits verderben, wenn ein erdfester, geeignet geschalteter Elektromagnet die Reibungsverluste des Pendels ausgleicht. Für einen Modellversuch kann man eine Stricknadel mit einer Spitze an einen Magneten hängen, der an einem Stativ angebracht ist, das sich seinerseits auf einem Tortenkarussell dreht.

Ein Pendel, das kopplungsfrei über einem Pol aufgehängt ist, schert sich nicht um die Erddrehung, sondern orientiert sich am sprichwörtlichen »Rest der Welt« (der auch von dieser Stelle herzlich gegrüßt sei). Der besteht aus sehr vielen sehr schweren, aber auch ausgesprochen weit entfernten Objekten, insbesondere Sternen und Galaxien. Sie bewegen sich kreuz und quer und gar nicht einmal langsam, aber wir können ein Koordinatensystem wählen, in dem sich diese Bewegungen wegmitteln. Gegen dieses dreht sich die Erde einmal in einem siderischen Tag.

Damit führt uns das biedere Pendel auf ziemlich fundamentale Fragen. Mit einem berühmten Gedankenexperiment vom rotierenden, hängenden Eimer fast voll Wasser hat Sir Isaac Newton versucht, den absoluten Raum zu etablieren: Wenn der Eimer sich gegen diesen Raum nicht dreht, ist seine Oberfläche exakt eben, oder noch genauer: Sie nimmt die Form einer Äquipotenzialfläche auf ihrem Planeten an. Damit wird tatsächlich ein »absolutes« Bezugssystem ausgezeichnet gegenüber solchen, die sich dagegen drehen.

Wohlgemerkt: Es gibt kein ausgezeichnetes Bezugssystem unter allen, die sich gegeneinander mit (als Vektor!) kons-

Der Fall vom Turm

Wie einige wenige Gelehrte am Merton College in Oxford schon vor 600 Jahren wussten, ist bei der Bewegung mit konstanter Beschleunigung die Durchschnittsgeschwindigkeit genauso groß wie die augenblickliche Geschwindigkeit nach der ersten Hälfte der gesamten Zeit. Das gilt auch dann, wenn man nicht aus der Ruhe startet.

Ein fallender Gegenstand wird von der Erde mit (fast) 10 m/s² beschleunigt. Fällt er aus der Ruhe 5 Sekunden, so hat er nach 2,5 Sekunden, also der halben Zeit, 25 m/s erreicht, was dann der Durchschnitt für die ganzen 5 Sekunden ist. Die Falltiefe ist somit 125 Meter.

tanter Geschwindigkeit bewegen. Bereits aus der klassischen (newtonschen) Mechanik ergibt sich, dass es kein mechanisches Experiment gibt, mit dem man ein absolutes System auszeichnen oder herausfinden könnte. Nach der speziellen Relativitätstheorie, insbesondere der Invarianz der Lichtgeschwindigkeit, gilt dies auch für optische Experimente. Gegen Drehungen des Bezugssystems ist die Physik jedoch keineswegs so gleichgültig wie gegen Translationsbewegungen – siehe den newtonschen Eimerversuch.

Ernst Mach (1838–1916) hat die Frage aufgeworfen (und Albert Einstein hat sie weiterverfolgt): Was würde das Pendel eigentlich tun, wenn es mit der Erde ganz allein in der Welt wäre? Benötigt das Pendel die Galaxien, oder kommt es mit einem absoluten Raum aus, auch wenn der leer ist? Da wir den Rest der Welt nicht einfach wegschaffen können, gibt es keine experimentelle Antwort auf die Frage.

Radlinien

In einem Koordinatensystem, das wieder mit der Erde mitwandert, aber seine Orientierung beibehält, bleibt das Pendel auf dem Pol dauernd in ein und derselben Ebene, die rechtwinklig zum Erdboden, also im Wortsinn senkrecht steht. Das gilt allerdings nur, wenn man es durch Anstoßen aus der stabilen Ruhelage in Bewegung setzt. Bei der üblichen Art mit Auslenken und Loslassen gibt man dem Pendel ein bisschen Impuls von der Erddrehung mit, wodurch die Bewegung auf die Dauer nicht in einer Ebene bleibt.

Wenn die Auslenkung des Pendels klein gegen seine Länge ist, dürfen wir unterstellen, dass der Schwerpunkt des Pendelkörpers sich statt auf einer Kugelschale auf einem Paraboloid bewegt. Unter dieser Voraussetzung sind die waagerechten Komponenten der Beschleunigung stets zur Mitte gerichtet und proportional zum Abstand von dieser, und in der Projektion auf die Waagerechte ist das Pendel ein harmonischer Oszillator in zwei Dimensionen. Dessen Bahnkurve ist allgemein eine Ellipse. Sie entartet zur – hin und her durchlaufenen – Strecke, wenn der Anfangsimpuls genau auf den Mittelpunkt zu- oder von ihm weggerichtet ist, und zum Kreis, wenn dieser Impuls rechtwinklig zur Verbindungsstrecke zwischen Anfangsposition und Mittelpunkt ist und die passende Größe hat.

Das gilt, wohlgemerkt, in Bezug auf das (am Fixsternhimmel orientierte) Inertialsystem. Nehmen wir an, dass dem Pendelkörper ein dünner, stets nach unten gerichteter Tintenstrahl entströmt. Dann würde er nicht etwa eine Ellipse in die unmittelbare Umgebung des Pols zeichnen. Dafür müsste man vielmehr das Zeichenpapier auf eine Drehscheibe legen, die mit genau einer Umdrehung pro Tag rotiert und dadurch relativ zu den Fixsternen in Ruhe bleibt (eine »Nachführung« nennen die Astronomen eine solche Mechanik, die ihren Fernrohren gestattet, stundenlang unverwandt denselben Stern anzustarren). Auf bodenfestem Zeichenpapier überlagert sich der Pendelbewegung die Erddrehung.

Damit begegnen wir abermals einer ebenso schönen wie interessanten Klasse von ebenen Kurven, die wir in mehreren Folgen dieser Rubrik (11 und 12/2005 sowie 3 bis 5/2007) bereits kennen gelernt haben: den Radlinien. Unter diesem Oberbegriff fasst man die Epi- und die Hypotrochoiden zusammen.

Eine Radlinie entsteht dadurch, dass man in einer Ebene zwei Kreisbewegungen mit jeweils konstanten Winkelgeschwindigkeiten vektoriell addiert. Jede Radline kann auf zwei verschiedene Arten durch Abrollen eines Kreises von innen oder von außen an einem anderen Kreis erzeugt werden, was sehr schön mit Zahnrädern funktioniert.

Dreht man, während eine Radlinie gezeichnet wird, das Zeichenblatt gleichmäßig, so ergibt sich ebenfalls eine Radlinie, wenn auch nicht unbedingt von der gleichen Sorte. Das kann man mit elementarer Trigonometrie zeigen.

Ellipsen sind spezielle Radlinien; das gilt auch für jene bis zur Unkenntlichkeit abgemagerten Ellipsen, die wir gemeinhin als Strecken bezeichnen. Unser Tinte verströmendes Foucault-Pendel zeichnet also eine Radlinie auf das bodenfeste Zeichenblatt (Kasten rechts).

Wenn es im Inertialsystem auf (genauer: über) einer Strecke schwingt, so ändert sich durch die Erddrehung nichts an der Tatsache, dass es bei jeder Schwingung durch den Nullpunkt läuft. Die Kurve ist im rotierenden Bezugssystem daher eine Rhodanee. Mit diesem romantischen Namen (»Rosenkurve«) bezeichnet man eine Radkurve, die immer wieder den Mittelpunkt durchläuft und außen schön rund ist.

Halten wir dagegen das Pendel vor dem Start ausgelenkt fest, so läuft es zusammen mit der Hand auf einem Kreis im Inertialsystem, ruht aber im rotierenden System. Lässt man es los, so läuft es im Inertialsystem auf einer Ellipse und daher jedes Mal am Nullpunkt vorbei. In den Zeitpunkten maximaler Auslenkung bewegt es sich im Inertialsystem; im rotierenden System ruht es einen Augenblick wie beim Start, aber jedes Mal an einer anderen Stelle. Das gibt die Spitzen einer Hypozykloide.

Wo bleibt Coriolis?

Wenn man die ganze theoretische Rechnung, die im Inertialsystem sehr einfach ist, in ein rotierendes System transformiert, ist sie nicht mehr wirklich einfach. Unter anderem tritt eine nach Gaspard Gustave de Coriolis (1792–1843) benannte Beschleunigung auf, sobald sich etwas relativ zum rotierenden System bewegt. Sie kann als Rechenhilfsmittel gute Dienste leisten, man sollte aber die zugehörige Kraft nicht besonders ernst nehmen. Das Gleiche gilt auch für die ebenfalls hier formal auftretende Zentrifugalkraft. Beide sind in diesem Sinne Scheinkräfte: Sie scheinen in Systemen aufzutreten, die keine Inertialsysteme sind.

Inertialsystem

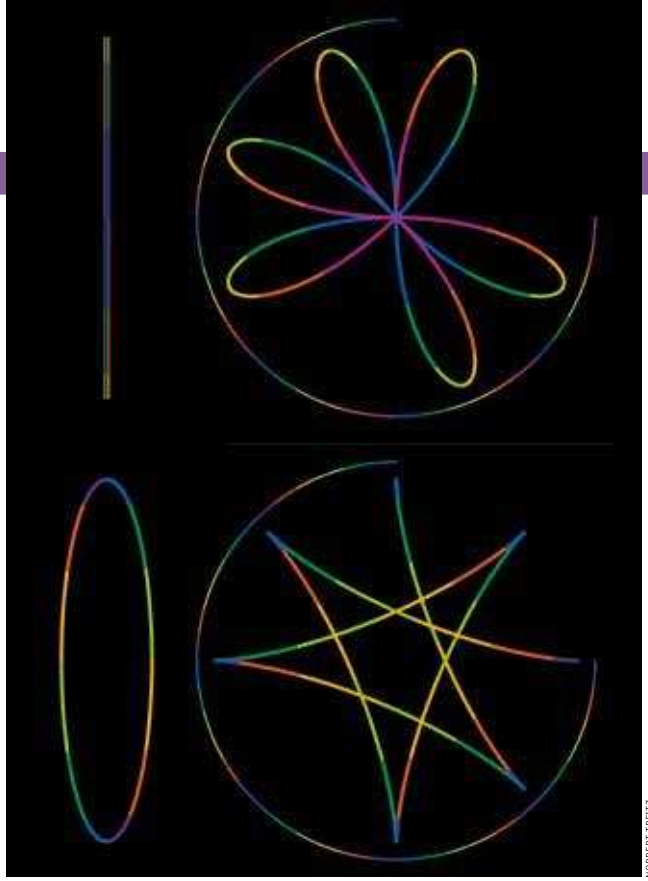
Ein Inertialsystem ist ein Bezugssystem (das heißt eine Klasse von Koordinatensystemen, die sich nur durch die Wahl des Nullpunkts unterscheiden), in dem die Impulserhaltung unmittelbar abgelesen werden kann. Sie ist als das erste der berühmten drei Gesetze aus Newtons »Principia« so formuliert: Für jedes unbeeinflusste Objekt bleibt dessen im System gemessener Geschwindigkeitsvektor konstant. Mit »unbeeinflusst« ist genau gemeint, dass kein Impuls importiert wird. Ziemlich gute Näherungen sind Gebäude auf der Erde und geradeaus fahrende Züge. Die Ostabweichung und das Foucault-Pendel zeigen aber, dass es sich nicht wirklich genau um Inertialsysteme handelt.

Die Spur des Foucault-Pendels

Wir blicken von oben auf ein über einem Erdpol (mit sehr niedriger Frequenz) schwingendes Foucault-Pendel, links im Inertialsystem (»siderisch«, das heißt mit konstanter Orientierung gegenüber dem Fixsternhimmel), rechts in einem mit der Erde mitrotierenden System, in dem außen noch ein auf einen festen Stern ausgerichteter Punktzeiger mitläuft.

Oben: Start durch Anstoßen aus dem Mittelpunkt heraus. Unten: Start durch Auslenken und Loslassen. Die Bahnkurven sind oben Strecke und Rhodanee, unten Ellipse und Hypozykloide.

Damit Sie den zeitlichen Ablauf besser sehen können, liefert das für die Zeichnungen verwendete virtuelle Tintenfass in festem Wechsel sechs verschiedene Farben, beginnend mit Blau und Grün, und durch einen geheimen Zaubertrick malt es die Spuren auf Hin- und Rückweg knapp nebeneinander, wo sie sich eigentlich verdecken müssten. Bemerkenswerterweise ergibt sich im unteren Bild (Auslenken und Loslassen) im Inertialsystem eine Rechtskurve, während im rotierenden für den gleichen Vorgang lauter Linkskurven entstehen.



NORBERT TREITZ

Das kann man sich etwa so vorstellen: Sie filmen mit einer Videokamera ein großes und schweres Haus und drehen dabei beschleunigt die Kamera. Auf dem Bildschirm sieht man ein sich mit dieser Beschleunigung bewegendes Haus. Die Kraft, die das Haus im Inertialsystem genau so bewegen würde, sprich diese Beschleunigung mal der Masse des Hauses, wäre wirklich schrecklich, schlimmer als bei einem Erdbeben. Zum Glück merkt man im Haus nichts von solcher Scheinkraft.

In dem Programm, mit dem ich die Bahnen im Kasten oben berechnet habe, kommt die aus Theorielehrbüchern bekannte Formel für die Coriolis-Beschleunigung nirgends vor.

Echte und vermeintliche Orientierungen von Wirbeln

Der Admiral und Meteorologe Christoph Heinrich Buys-Ballot (1817–1890) hat nicht nur mit Trompetern auf einer (sehr frühen) Eisenbahn den akustischen Dopplereffekt experimentell nachgewiesen, sondern auch gefunden, wie Winde auf der rotierenden Erde abgelenkt werden: Auf der Nordhalbkugel drehen in ein Tief einlaufende (Wirbel-) Winde gegen den Uhrzeiger, auf der anderen umgekehrt. Das ist mit der Coriolis-Beschleunigung recht elegant zu erklären.

Früher wurde in manchen Lehrbüchern behauptet, Entsprechendes könne man auch in auslaufenden Badewannen beobachten, weil es theoretisch so sein sollte (Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 120). In einer der schönsten Folgen der »Simpsons« hat Lisa in der Schule auch so etwas gelernt und veranlasst ihren Bruder Bart zu einer fernmündlichen Erkundung darüber mit einem R-Gespräch nach Australien, nicht ohne ihn vorher – in den Grenzen seiner Möglichkeiten – über seinen Globus aufzuklären. Das führt dann wegen der beträchtlichen unbezahlten Telefonrechnung zu heftigen diplomatischen Problemen der USA mit Australien und zu einer Reise dorthin, übrigens ergänzt mit einer sehr hübschen virtuellen Kamerafahrt durch das Erdinnere. Bart bekommt *down under* sogar einen ziemlich aufwändigen Abfluss vorgeführt, der extra für Besucher von der Nordhalbkugel umgelenkt wird, damit diese nicht durch ungewohnte Beobachtungen irritiert werden. Das ist doch die wahre Rücksichtnahme auf Lehrbuch-Enten und ihre Opfer!

Elementarisierung

Ganz zum Schluss wieder etwas ernsthafte Didaktik: Der harmonische Oszillator ist ein relativ einfaches Problem der Physik, die Drehung eines ebenen Koordinatensystems ein einfaches Problem der analytischen Geometrie. Die Bewegung eines Pendels in einem rotierenden Bezugssystem ist dagegen rechnerisch und mehr noch begrifflich ein verzwicktes Problem der theoretischen Physik, selbst in der entschärften Version mit dem Pendelstandort an einem Pol.

Elementarisierung bedeutet keineswegs, etwas falsch oder nur teilweise zu erklären, sondern die entscheidenden einfachen Zutaten klar zu zeigen. Das Programm für das einfache Problem besteht aus sieben Zeilen und ist ohne Weiteres nachzuvollziehen. Ein entsprechendes Programm für das Pendel im rotierenden Bezugssystem läuft auf dem Computer genauso gut und produziert dieselben Kurven; aber darauf kommt es nicht an. Richtig eingesetzt, ersetzt der Computer kein Experiment, sondern bestätigt unsere Interpretation von ihm. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972376.

REINEMACHEN in der

Zellen erhalten sich in einem guten Betriebszustand durch so genannte Autophagie. Wird dieser Prozess gestört, altert die Zelle schneller oder erkrankt, was das Ganze auch für die Entwickler neuer Medikamente interessant macht.

In Kürze

- Spezielle Unterabteilungen machen innerhalb höherer Zellen klar Schiff und verschlingen dazu ständig **kleine Mengen Zytoplasma** mitsamt allem, was darin ist – wie defekte Zellbestandteile sowie eingedrungene Bakterien und Viren. Die Fracht geht an **Demontageeinheiten**, die wiederverwertbare Teile dem Rest der Zelle zuführen.
- Der ganze Prozess, Autophagie genannt, wird gegenwärtig eingehend erforscht, insbesondere **welche Proteinsignale diese »Selbstkannibalisierung«** antreiben und kontrollieren.
- Ein umfassenderes Verständnis eröffnet neue denkbare Ansätze in der **Behandlung von Krebs, Infektionskrankheiten,** Immunstörungen oder Demenz – und könnte irgendwann vielleicht sogar dazu beitragen, das Altern zu verzögern.

Von Vojo Deretic und Daniel J. Klionsky

Das passiert in der biologischen Forschung immer mal wieder: Da gibt es auf Zellebene einen scheinbar unbedeutenden, recht obskuren Vorgang – und dann entpuppt er sich als hochbedeutsam. Er wird als weit verbreiteter Mechanismus erkannt, der bei einer ganzen Reihe normaler oder krankhafter Prozesse eine Rolle spielt. So geschehen im Fall von Stickstoffmonoxid, das als eigentlich giftiges Zwischenprodukt einer biochemischen Zellreaktion auftauchte und sich dann unter anderem als wichtiger Botenstoff erwies (siehe SdW 7/1992, S. 72). Die Entdeckung seiner Funktion speziell im Kreislaufsystem, 1998 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet, führte zur Entwicklung etlicher segensreicher Medikamente.

In neuerer Zeit erleben wir nun, wie ein anderer vermeintlich unbedeutender Zellprozess ins Rampenlicht tritt: die Autophagie. Der Begriff kommt aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie sich selbst fressen. Verzehrt werden dabei, grob gesehen, einfach Happen von Zytoplasma – das Material innerhalb der Zelle, aber außerhalb ihres Kerns. Die Grundsubstanz ist eine Art formloses Gelee, das von einer skelettähnlichen Matrix gestützt wird. Darin eingebettet sind weitere Plasmakomponenten, darunter vielfältige Makromoleküle und so genannte Zellorganellen, also spezialisierte funktionelle Untereinheiten der Zelle. Beim Betrieb dieser komplexen Maschinerie fällt ständig störender Abfall an. Autophagie ist daher zum Teil ein Reinigungsprozess: Brocken alter Proteine und anderer unerwünschter Sperrmüll, sogar defekte ganze Organellen werden abgefischt, regelrecht verdaut und die Bausteine zum Wiederaufbau neuer Komponenten verwendet.

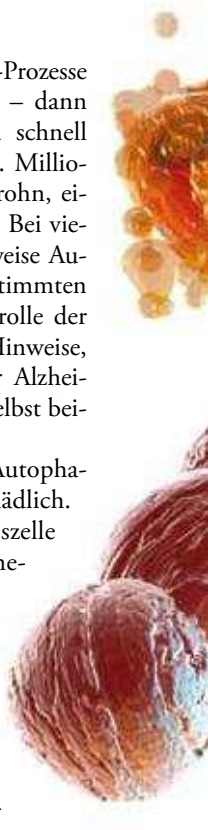
Dies kann jeder Zelle frischen Lebensschwung geben, besonders wichtig ist es aber für jene, die nicht ersetzt werden können. Neurone etwa, die so lange bestehen müssen wie ihr Besitzer, haben nahezu keine andere Möglichkeit, ihre Maschinerie zu erneuern und ihren Betrieb aufrechtzuerhalten.

Autophagie erfüllt noch einen anderen Zweck: als Verteidigungsmaßnahme gegen gefährliche Viren und Bakterien. Jedes fremde Objekt und jeder Organismus, der die vorgeschalteten Abwehrlinien des Immunsystems unterläuft und bis ins Zellplasma gelangt, wird dort zum potenziellen Ziel des Autophagie-Systems.

Kehrseite einer Medaille

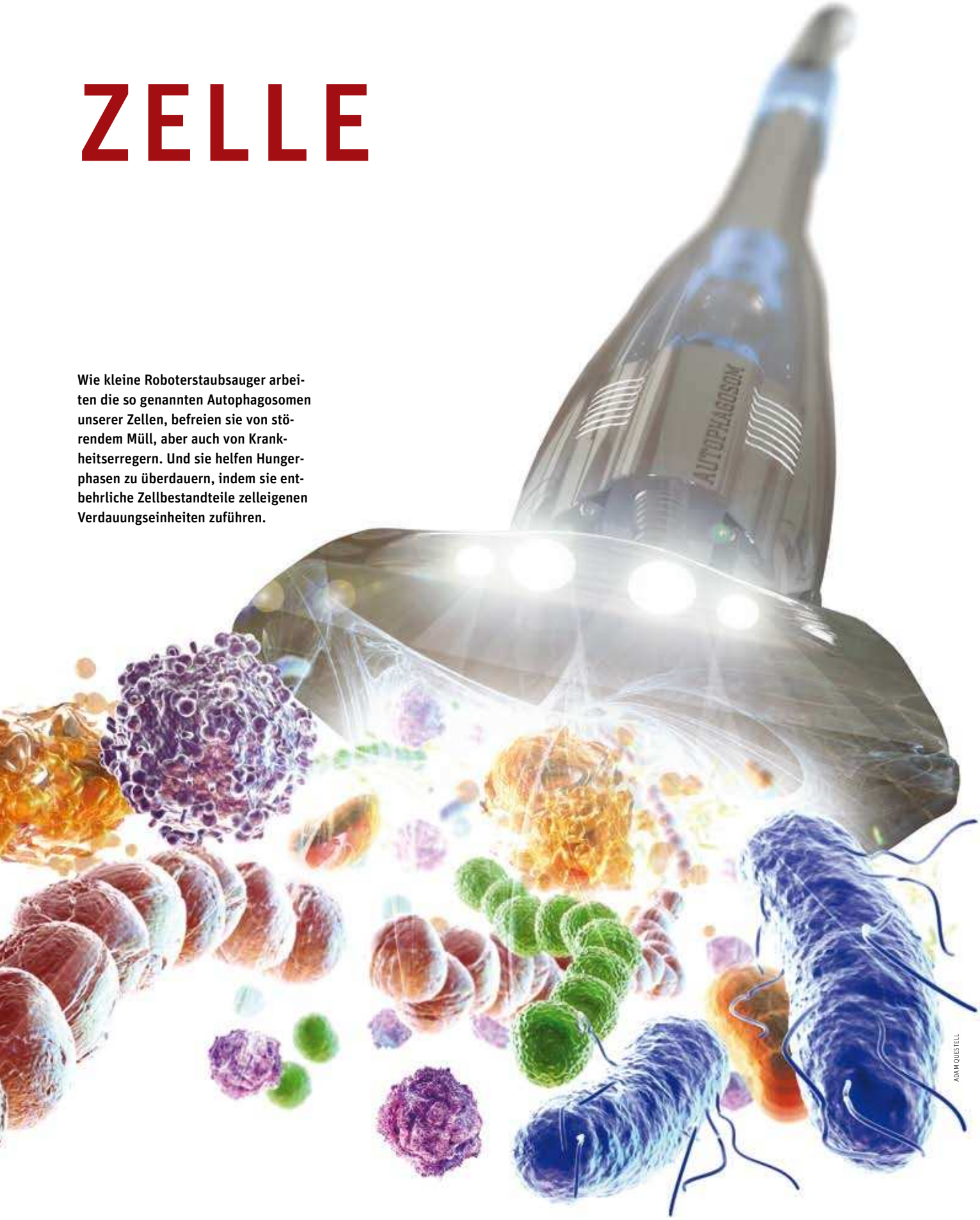
Andererseits können Autophagie-Prozesse auch negative Konsequenzen haben – dann nämlich, wenn sie zu langsam, zu schnell oder anderweitig fehlerhaft ablaufen. Millionen Menschen leiden an Morbus Crohn, einer entzündlichen Darmerkrankung. Bei vielen dieser Patienten sind möglicherweise Autophagie-Systeme defekt, etwa in bestimmten Dünndarmzellen, die für eine Kontrolle der Darmflora sorgen. Es gibt zudem Hinweise, dass ein Versagen in Hirnzellen zur Alzheimerkrankheit wie auch zum Altern selbst beitragen könnte.

Selbst ein gut funktionierendes Autophagie-System ist unter Umständen schädlich. Dann nämlich, wenn es einer Krebszelle ermöglicht, eine Strahlen- oder Chemotherapie zu überstehen und sich anschließend selbst zu reparieren. Manchmal bewirken Autophagie-Prozesse allerdings, dass eine erkrankte Zelle untergeht – zum Wohl des Organismus. Sie können aber auch übers Ziel hinausschießen und dann Körperzellen eli-



ZELLE

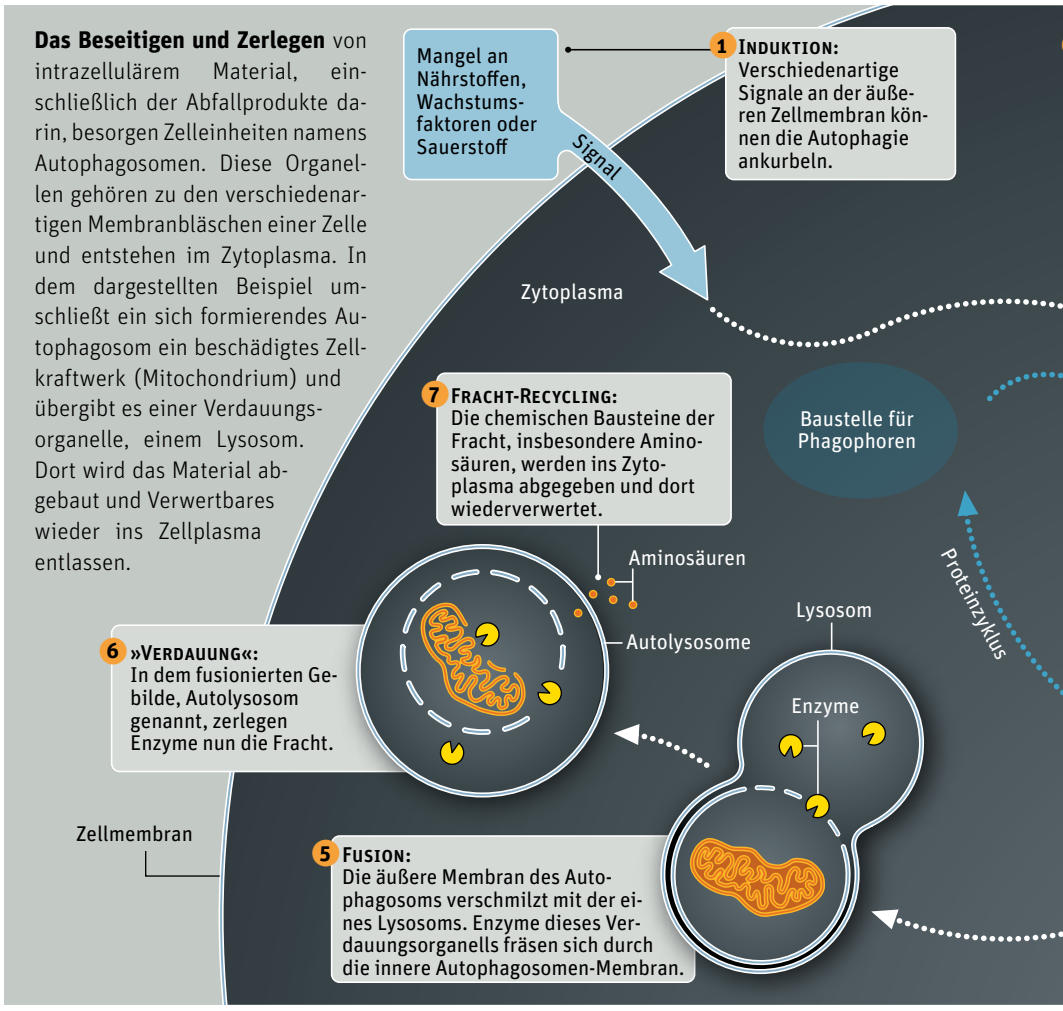
Wie kleine Roboterstaubsauger arbeiten die so genannten Autophagosomen unserer Zellen, befreien sie von störendem Müll, aber auch von Krankheitserregern. Und sie helfen Hungerphasen zu überdauern, indem sie entbehrliche Zellbestandteile zelleigenen Verdauungseinheiten zuführen.



ADAM QUESTELL

Autophagie – Schritt für Schritt

Das Beseitigen und Zerlegen von intrazellulärem Material, einschließlich der Abfallprodukte darin, besorgen Zelleinheiten namens Autophagosomen. Diese Organellen gehören zu den verschiedenartigen Membranbläschen einer Zelle und entstehen im Zytoplasma. In dem dargestellten Beispiel umschließt ein sich formierendes Autophagosom ein beschädigtes Zellkraftwerk (Mitochondrium) und übergibt es einer Verdauungsorganelle, einem Lysosom. Dort wird das Material abgebaut und Verwertbares wieder ins Zellplasma entlassen.



Autophagie, genauer die Makroautophagie, ist eher für den Sperrmüll in Zellen zuständig. Speziell markierte Proteine können dagegen in einem eigenen Schreddersystem zerhäckselt und ihre Bausteine recycelt werden.

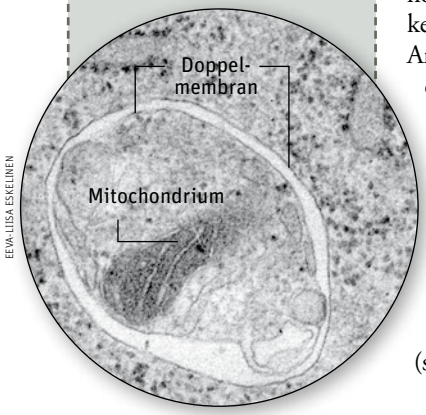
minieren, obwohl das nicht im Interesse des Organismus liegt.

In den letzten zehn Jahren haben die Forscher sehr viel darüber gelernt, wie die Autophagie im Detail funktioniert. Solche Einsichten sind nicht nur für das grundlegende Verständnis der zellulären Funktionen wichtig. Sie führen, so die Hoffnung, auch zur Entwicklung von Medikamenten, die das System hoch- oder herunterregeln. Die Geschwindigkeit des »Selbstfressens« und seine spezifischen Angriffsziele zu beeinflussen, könnte einen enormen therapeutischen Nutzen haben und vielleicht sogar den altersbedingten Verfall der Hirnfunktion verzögern helfen.

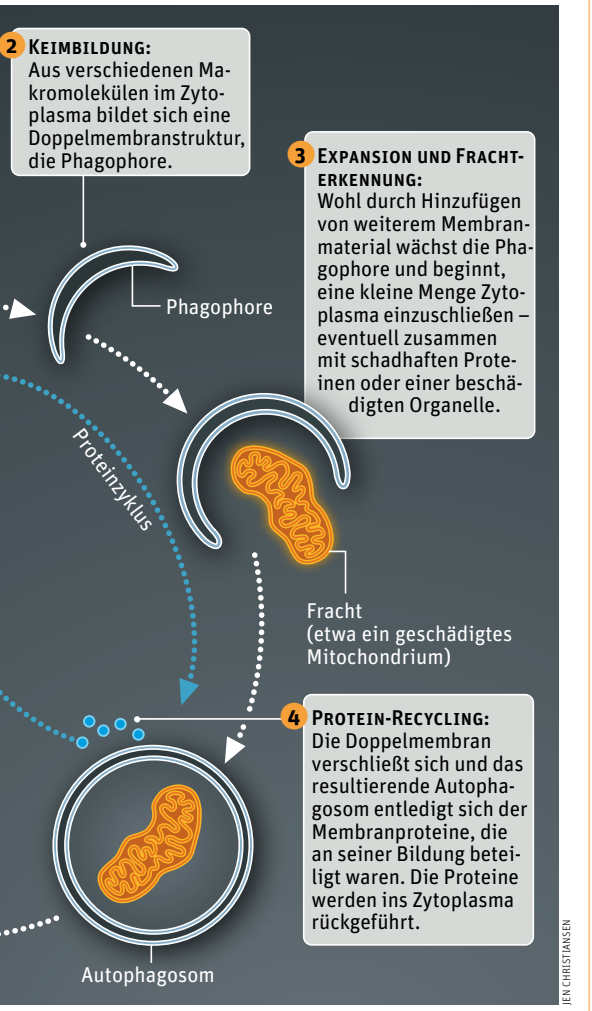
Biologen wenden den Begriff Autophagie auf verschiedene verwandte Prozesse an. Hier meinen wir damit nur jene Art der zellulären Säuberung, die fachlich als Makroautophagie bekannt ist und bislang am gründlichsten untersucht wurde (siehe kleinen Kasten links oben). Der Vorgang ist ein Schauspiel in mehreren Akten, und jeder Akteur hat einen speziellen Namen (siehe Kasten oben).

Das Ganze beginnt, indem verschiedene Proteine und Lipide (fettartige Moleküle) sich im Zytoplasma zu doppellagigen Membranblättern zusammenlagern. Die wachsenden Blätter krümmen sich sichelförmig ein und vereinnahmen dabei eine Portion Zytoplasma – mit allem, was darin ist. Das Beutelchen, als Phagophore bezeichnet, verschließt sich zu einer Kapsel, dem Autophagosom. Dieses befördert seine Fracht meist zu einem Lysosom, einer Art Müllbeseitigungsanlage andernorts im Zytoplasma, die voller abbauender Enzyme steckt. In der Regel verschmelzen die beiden Gebilde zu einem Autolysosom, in dem sich dann die lysosomalen »Verdauungssäfte« über die Ladung hermachen. Bei der Verdauung entstehen wiederverwertbare Molekülbruchstücke, die ins Zytoplasma abgegeben werden.

Ein Autophagosom hat mit seiner Doppelmembran ein Mitochondrium nebst Zytoplasma eingeschlossen. Die elektronenmikroskopische Aufnahme ist 35 000-fach vergrößert.



EEVA-LIISA ESKELINEN



Der Prozess in ungefährer Form ist als Grundaktivität von Zellen spätestens seit den 1960er Jahren bekannt. Damals untersuchten Christian de Duve an der späteren New Yorker Rockefeller University und andere Wissenschaftler ihn im Elektronenmikroskop.

Vor zehn Jahren begann dann einer von uns (Klionsky), die Autophagie in einzelligen Hefen molekularbiologisch zu erforschen, was dort viel einfacher geht als bei Tieren oder Menschen. Das taten auch einige andere Forscher, vor allem ein Team um Yoshinori Ohsumi vom National Institute for Basic Biology in Okazi (Japan). Dadurch wurden zahlreiche Details des Autophagie-Mechanismus aufgedeckt, die andernfalls schwer zu ergründen gewesen wären. Die Strategie ging auf, weil viele Proteine, die an dem Prozess in Hefezellen mitwirken oder ihn regulieren, nahezu identisch mit ihren Gegenstücken in menschlichen Zellen sind. Sie haben sich im Lauf der Evolution kaum verändert.

Die Autophagie könnte einst zur Überbrückung zellulärer Mangelzustände entstanden sein, aber auch als primitive Immunabwehr – oder beides. Eine hungernde Zelle verhält sich im Kleinen bereits etwa so wie der Körper bei Nahrungsmangel im Großen. Dieser wird nicht sofort funktionsunfähig und stirbt, sondern greift auf die eigenen Reserven zurück. Zunächst baut er gewöhnlich Fettpolster ab, schließlich jedoch auch Muskulatur, und hält mit dem verstoffwechselten Material die wichtigsten Lebensfunktionen am Laufen. Ganz ähnlich bauen bei versiegender Nährstoffzufuhr auch Zellen eigene Komponenten teilweise ab, um ihre wesentlichen Funktionen aufrechtzuerhalten.

Selbstkannibalismus als Überlebenshilfe

Autophagosomen sind zwar dauernd aktiv, ob eine Zelle hungert oder nicht; sie verschlingen ständig kleine Mengen Zytoplasma und sorgen so letztlich zugleich dafür, dass sich dessen Inhalt großenteils immer wieder erneuert. Verschiedene Stressfaktoren jedoch – etwa Mangel an Nährstoffen, Wachstumsfaktoren oder Sauerstoff – veranlassen die Zelle, vermehrt Autophagosomen zu bilden. Dem Zytoplasma wird dann verstärkt Verdauliches entnommen – darunter fallen offenbar nicht nur defekte, sondern auch entbehrliche Proteine und Organellen –, was der Zelle wieder Nährstoffe und Energie liefert.

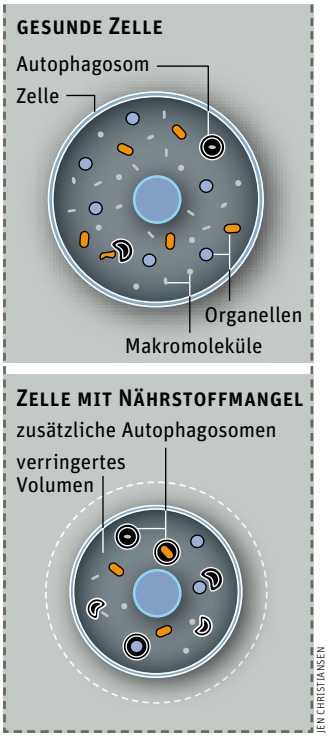
Selbst wenn sich die Autophagie wohl ursprünglich als Reaktion auf Mangelzustände entwickelte, zumindest teilweise, ist ihre ständige Grundaktivität – auch bei Überfluss – schon lange genauso lebenswichtig für die Zelle geworden. Autophagosomen helfen ihren Besitzern, sich von diversen unliebsamen Bestandteilen des Zytoplasmas zu befreien. Proteine für die Zellarbeit etwa werden manchmal falsch zusammengesetzt oder können mit der Zeit verschleißen. Funktionseinbußen oder, schlimmer noch, Fehlfunktionen sind mögliche Folgen. Solche Proteine oder Proteinkomplexe müssen schnell entsorgt werden, bevor sie ernsthafte Probleme verursachen. Permanente Autophagie hält ihre Konzentration auf einem niedrigen Level.

Die Autophagosomen finden und beschlagnahmen auch schadhafte Organellen, die um ein Vielfaches größer sind als Eiweißmoleküle. Mitochondrien etwa, die zelleigenen Kraftwerke, können dann Signale an Instanzen aussenden, die das Selbstmordprogramm der Zelle einleiten.

Zellen starten diese so genannte Apoptose (siehe Kasten S. 62 unten) sowie SdW 2/1997, S. 26) aus verschiedenen Gründen, alles mehr

HUNGERPHASEN ÜBERSTEHEN

Autophagosomen verzehren ständig kleine Teile des Zytoplasmas. Bei Nährstoffmangel jedoch erhöht sich ihre Zahl beträchtlich. Das steigert die Geschwindigkeit, mit der intrazelluläre Komponenten – einschließlich intakter Proteine und anderer Makromoleküle – durch Autolysosomen in ihre Grundbausteine zerlegt und dem Zytoplasma als Nährstoffe wieder übergeben werden. Zudem verringern hungernde Zellen ihren funktionellen Inhalt (schematisch als Schrumpfung dargestellt). Ohne dieses »Selbstfressen« könnten die wesentlichen Zellaktivitäten nicht aufrechterhalten werden, und die Zelle würde rasch sterben.

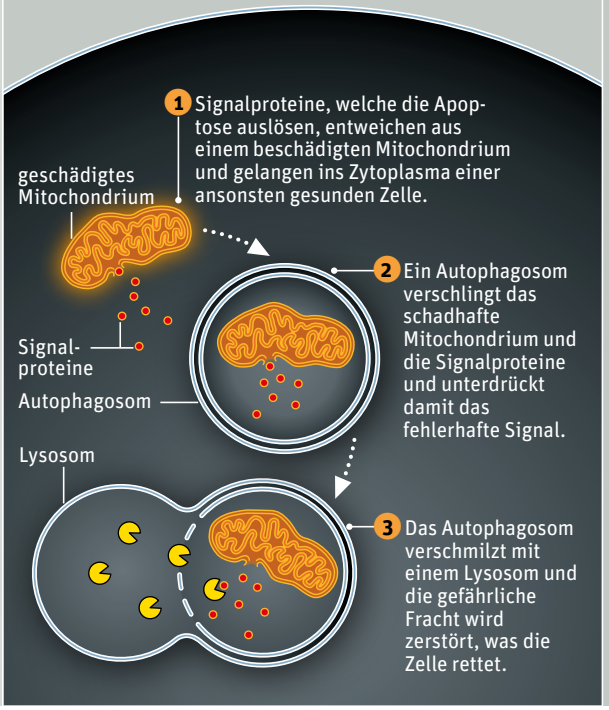


Entscheidung auf Leben und Tod

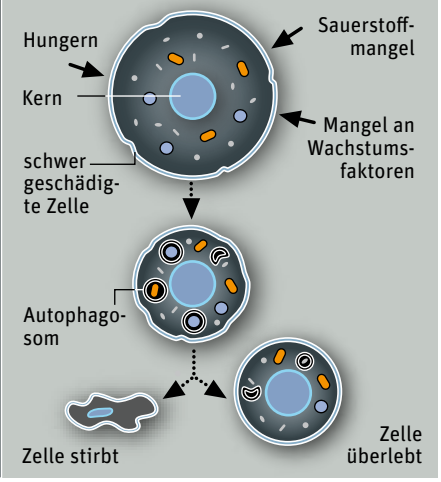
Der letzte Akt einer schwer geschädigten Zelle kann darin bestehen, die eigene Auflösung einzuleiten – zum Wohl des Organismus. Ein zelleigenes Selbstmordprogramm, die so genannte Apoptose, kommt in Gang, wenn defekte Mitochondrien spezielle Signalproteine ins Zytoplasma entlassen.

Einige Forscher vermuten, dass das Autophagie-System die Zelle vor einer unnötigen Apoptose bewahren kann (Diagramm Mitte). Paradoxerweise dient die Autophagie aber wohl auch als zweiter Weg zum Selbstmord, falls der Untergang der Zelle erforderlich ist, aber die Apoptose versagt (Diagramm rechts außen). Autophagie und Apoptose teilen sich überdies bestimmte Arten von Signalproteinen. Das legt den Schluss nahe, dass die beiden an einem Strang ziehen und vielleicht als Teile eines übergeordneten Systems betrachtet werden müssen. Beide Prozesse sorgen für eine geordnete Beseitigung der Zelle.

Autophagie als Sicherheitsnetz: Ein geschädigtes Mitochondrium signalisiert der Zelle unter Umständen fälschlicherweise bereits, das Apoptose-Programm zu starten. Das Autophagie-System kann dies unterbinden und die Zelle damit vor einem unnötigen Selbstmord bewahren.



Autophagie als »Entscheider«: In einer schwer geschädigten Zelle reagiert das System, das den zellulären Selbstmord auslöst, dynamisch auf Stresssignale. Letztlich wäre Verschiedenes möglich: Die Autophagie frisst die Zelle von innen zu Ende auf; fährt zurück, um der Zelle ein Überleben zu erlauben; gibt ihr das Signal zur Apoptose (nicht dargestellt); springt, falls diese versagt, als Reserveselbstmordprogramm ein, um einen desorganisierten Zerfall, eine Nekrose, zu verhindern (nicht dargestellt).



JEN CHRISTIANSEN

oder weniger zum Wohl des Organismus. Zum Beispiel entstehen im Körper ständig mehr Zellen, als er benötigt, so dass andere abtreten müssen. Wenn eine gealterte Zelle nicht mehr effizient arbeitet, entscheidet sie sich unter Umständen zur Auflösung, um Platz für jüngere, belastbare zu machen. Wenn eine Zelle sich ungehemmt zu vermehren beginnt, kann sie auch von außen angewiesen werden, Selbstmord zu begehen. Das macht die Apoptose zu einer der wichtigsten eingebauten Schutzbarrieren gegen Krebs. Als Selbstmordprogramm wird sie bezeichnet, weil sie auf einem komplexen Ablauf zellulärer Geschehnisse beruht, die von zahlreichen Proteinsignalen strikt gesteuert werden.

Ein fehlerhaftes Mitochondrium vermag allerdings viel Schaden anzurichten, wenn es die Apoptose auslöst, obwohl sie nicht angemessen ist (siehe Kasten oben). Unter den unvermeidlichen Nebenprodukten, die ein funktionierendes Mitochondrium erzeugt, sind reaktive Sauerstoffspezies, kurz ROS (siehe kleinen Kasten rechts oben). Sie bewirken oft, dass die Mitochondrien undicht werden und einen Teil ihres Inhalts verlieren – einschließlich der Signalproteine, die eine Apoptose einleiten. Ein unbedeutender Fehler in einer kleinen Organelle könnte daher versehentlich zum Untergang der ganzen Zelle führen. Solange es nur einige Zellen der Haut trifft, wäre das nicht sonderlich dramatisch, aber im Fall von Gedächtnisneuronen im Gehirn sehr wohl.

Apoptose, auch als programmierter Zelltod bekannt, läuft nach festen Regeln ab. Die Zelle zerlegt sich dabei in kleine Portionen, die von anderen Zellen rückstandslos aufgenommen und verwendet werden.

Nekrose ist dagegen ein unkontrollierter Zerfall, der das Gewebe schädigt.

Retter in der Not

Autophagie dient als Schutz vor derartigen Betriebsunfällen. Autophagosomen können geschädigte Mitochondrien und andere fehlerhafte Organellen aus dem Zytoplasma entfernen und gewährleisten, dass diese in einem abgeschlossenen Raum enzymatisch zerstört werden, bevor sie das Selbstmordprogramm auslösen oder – schlimmer – eine so genannte Nekrose (siehe kleinen Kasten links).

Teilweise geben Mitochondrien auch reaktive Sauerstoffspezies ins Zytoplasma ab, wo diese – ihr Name lässt es vermuten – gewöhnlich mit zahlreichen anderen Molekülen reagieren. In einer gesunden Zelle halten Antioxidantien die ROS-Konzentration in Grenzen. Nach Shengkan V. Jin von der University of Medicine and Dentistry of New Jersey kön-

nen beschädigte Mitochondrien die Zelle aber mit dem Zehnfachen der sonst üblichen ROS-Menge überfluten. Das ist weit mehr, als die normalen zellulären Entgiftungssysteme verkraften. Derartige Mengen stellen ein Krebsrisiko dar, denn wenn die reaktiven Substanzen den Zellkern erreichen, können sie dort gefährliche Veränderungen in Genen verursachen. Auch hier zeigt sich die Autophagie als Retter in der Not, der fehlerhafte Mitochondrien aus dem Verkehr zieht.

Schon bald, nachdem die verschlungenen molekularen Pfade der Apoptose entwirrt waren, erkannten Zellbiologen, dass ihre Studienobjekte sich noch auf andere Weise »einschmelzen« können. Als Hauptverdächtiger wurde das Autophagie-System ins Auge gefasst. Die derzeitige Nomenklatur spiegelt diese Vorgeschichte wieder: Autophagie wird manchmal als programmierter Zelltod Typ 2 bezeichnet – obwohl diese Benennung umstritten bleibt.

Autophagie könnte auf zweierlei Weise zum Untergang der Zelle führen: indem sie einfach ungebremst zytoplasmatische Bestandteile verdaut – oder indem sie die Apoptose stimuliert. Doch warum sollte ein Prozess, der oft einen unerwünschten Zelltod infolge versehentlicher Apoptose verhindert, manchmal genau das Gegenteil bewirken und die Zelle eliminieren?

Denkbar ist, dass Apoptose und Autophagie eng miteinander verknüpft und sorgfältig austariert sind. Wenn zum Beispiel das Ausmaß an Organellschäden die Autophagie als Schutz überfordert, muss sich die Zelle um des gesamten Organismus willen opfern. Diese könnte entweder den Selbstkannibalismus bis zum bitteren Ende fortsetzen oder das andere Selbstmordprogramm anschalten und die Autophagie nur für dessen Störfall in Reserve halten (rechte Spalte im Kasten links oben). Welche Beziehungen zwischen beiden bestehen und ob die Autophagie als eigenständiger Selbstmordmechanismus der Zelle betrachtet werden sollte – das sind zwei der Felder, die derzeit besonders intensiv erforscht, aber auch etwas kontrovers diskutiert werden.

Wie Beth Levine vom University of Texas Southwestern Medical Center in Dallas und Guido Kroemer vom französischen Nationalen Forschungszentrum INSERM in Villejuif (Frankreich) in neueren Arbeiten gezeigt haben, bindet sich eines der Proteine, die das Startsignal für die Autophagie geben, an ein andersartiges, das den Start der Apoptose verhindert. Und wenn die Bindungen zwischen diesen beiden Proteinen namens Beclin und Bcl-21 verstärkt oder gelöst werden, fallen Entscheidungen über Leben und Tod.

Solche Zusammenhänge zwischen Autophagie und Apoptose untermauert das zudem entdeckte Verhalten eines Proteins namens Atg5, das eine führende Rolle bei der Entstehung von Autophagosomen spielt. In etwas verkürzter Form kann es aber in die Mitochondrien gelangen und dort gewissermaßen einen Schalter umlegen: Eine anfänglich rein autophagische Zellreaktion verwandelt sich dann in eine apoptotische.

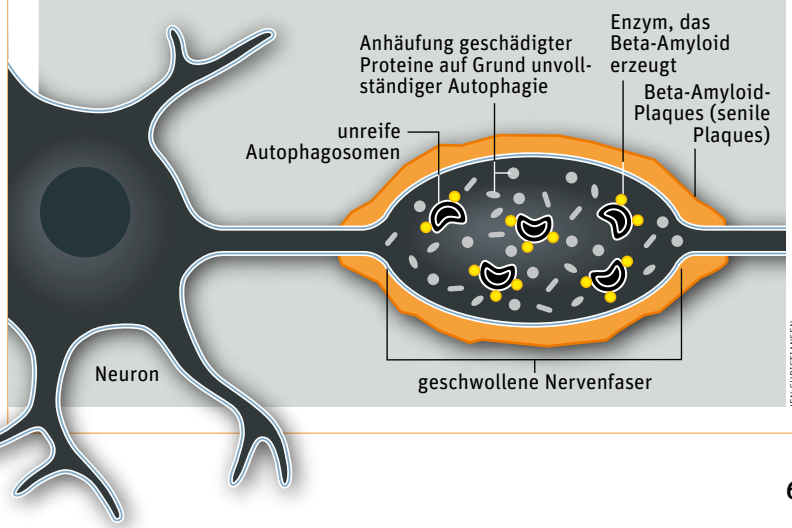
Wie eingangs schon angedeutet, hat auch die Autophagie ihre Haken. Krebstherapien zielen oft darauf ab, bösartige Zellen in den Selbstmord zu treiben. Einige Krebszellen widerstehen dem, weil ihr Autophagie-System geschädigte Mitochondrien rechtzeitig aus dem Zytoplasma entfernt, bevor diese die Apoptose auslösen. Tatsächlich können Strahlen- und Chemotherapien eine überdurchschnittlich intensive Autophagie in Gang setzen. Hinzu kommt, dass ins Innere eines Tumors nur wenig Nährstoffe gelangen – doch ein solcher Mangel vermag gerade, die Autophagie anzukurbeln, was Krebszellen dort vor dem raschen Verhungern bewahrt. (Krebszellen regen zudem das Wachstum neuer Blutgefäße an.)

Logisch erscheint daher die Strategie, die Autophagie innerhalb eines Tumors beziehungsweise während einer Strahlen- oder Chemotherapie zu unterdrücken. Entspre-

Reaktive Sauerstoffspezies, abgekürzt ROS nach englisch *reactive oxygen species*, entreißen anderen Substanzen besonders begierig Elektronen und oxidieren sie dadurch. Zu den ROS gehören etwa Ozon und Wasserstoffperoxid sowie so genannte freie Radikale.

Autophagie und Alzheimerkrankheit

In einem alternden Hirnneuron kann es vorkommen, dass die Autophagosomen ihre Entwicklung nicht vollenden. Die Folge: Geschädigte Proteine häufen sich in seinen Zellfortsätzen an und lassen diese anschwellen. Die unreifen Autophagosomen sammeln sich ebenfalls dort an. Auf ihnen scheinen sich Enzyme (hellgelb) anzureichern, die Proteinfragmente namens Beta-Amyloid erzeugen. Diese wiederum lagern sich auf der Außenseite der Faser ab, als Hauptbestandteil der so genannten senilen Plaques (orange), die gehäuft im Gehirn von Alzheimerpatienten auftreten. Zusammen deuten diese Befunde darauf hin, dass ein Versagen der Autophagie möglicherweise zur Alzheimerkrankheit beiträgt.



JEN CHRISTIANSEN

Zwei Millionen Todesopfer fordert der Erreger der Tuberkulose weltweit jährlich – Autophagie kann ihn beseitigen

chende Pharmaka werden bereits klinisch getestet. Wie Eileen White von der Rutgers University in Piscataway aber warnt, könnten Krebszellen, deren Autophagie-System unterdrückt ist, leider viel mehr genetische Mutationen erleiden – was Rückfalle durch verbliebene Zellen wahrscheinlicher macht. Damit die Strategie wie gewünscht funktioniert, bedarf es daher noch sorgfältiger Feinarbeit, welche die verschiedenen Effekte berücksichtigt (siehe auch das Interview S. 66).

Altern und Alzheimer

Bei neurodegenerativen Störungen wie der Alzheimer-, Parkinson- oder Huntingtonkrankheit scheint eine ineffiziente Autophagie eine besondere Rolle zu spielen. Alle drei verursachen langsame, aber unaufhaltsame Veränderungen im Gehirn. Am häufigsten ist die Alzheimerkrankheit – eine Demenzform, an der allein in der Bundesrepublik mehr als eine Million Menschen leiden.

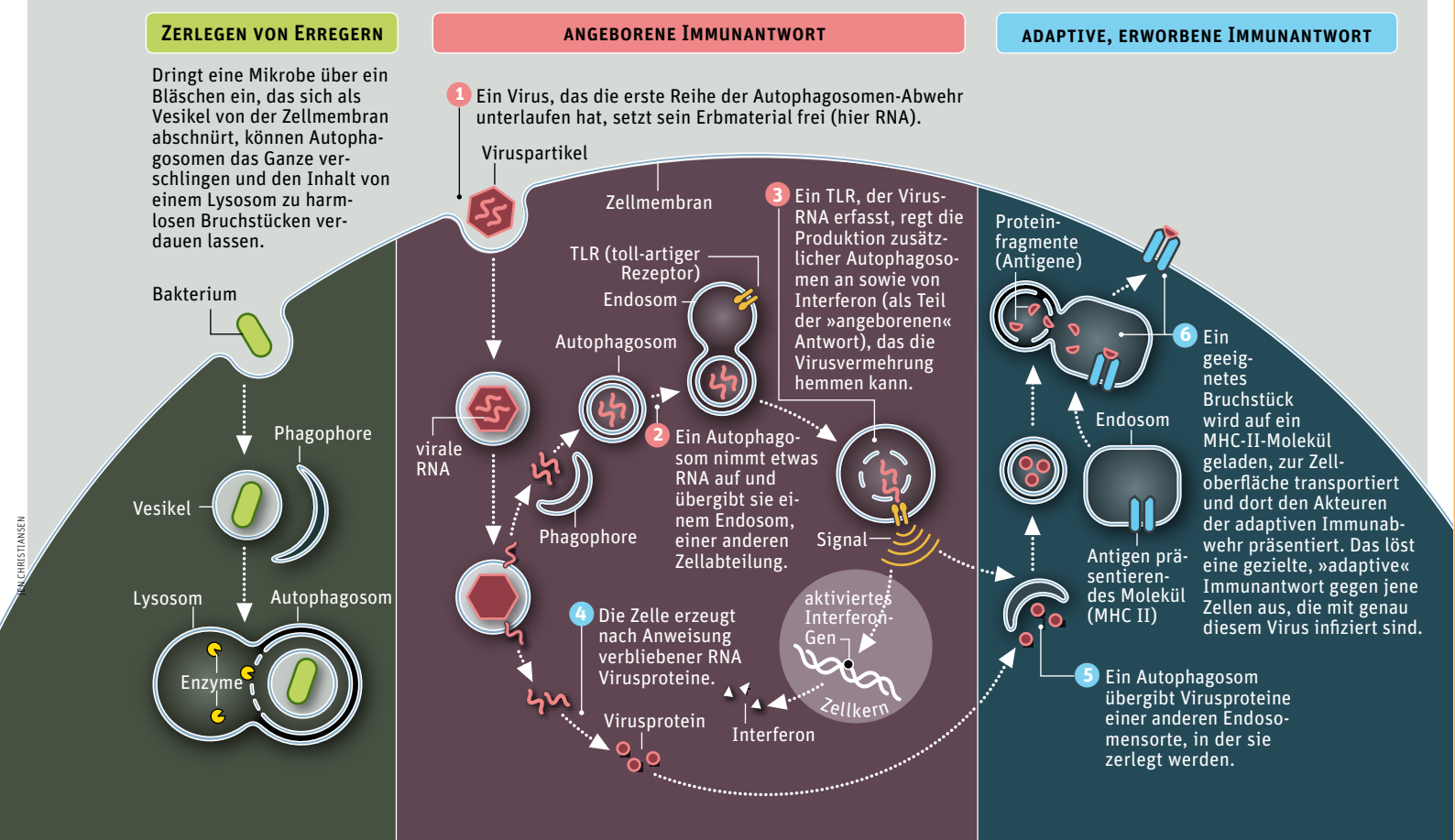
Im Zuge normalen Alterns sammelt sich im Zellkörper von Hirnneuronen sehr oft ein bräunliches Material namens Lipofuscin an. Es handelt sich um eine Mixtur von Lipiden und Proteinen. Oberflächlich betrachtet ähnelt das Ganze Altersflecken, die mit den Jahren auf der Haut entstehen. Laut Ralph A. Nixon vom Nathan S. Kline Institute for Psychiatric Research in Orangeburg (Bundesstaat New York) weist eine solche Anreicherung darauf hin, dass alternde Hirnzellen nicht mehr in der Lage sind, abnorm veränderte oder geschädigte Proteine so schnell abzubauen, wie sie entstehen.

Bei Alzheimerpatienten häuft sich auch ein gelbliches oder bräunliches Pigment namens Ceroid an, und zwar lokal in den Fortsätzen der Neurone. Dort schwellen die Fortsätze an, und auf ihrer Außenseite bilden sich die charakteristischen Amyloid-Ablagerungen.

Noch ist nicht völlig klar, wie diese so genannten senilen Plaques oder ihre Vorstufen die Gehirnzellen im Einzelnen schädigen. Aber neueste Studien wiesen interessanterweise auf den Membranen von Autophagosomen Enzyme nach, die bei bestimmten Formen schon früh einsetzender Alzheimerkrankheit zur Plaque-Ablagerung beitragen. Nixon zufolge könnten solche Ablagerungen zum Teil von einer unvollständigen Autophagie herrühren, welche die betroffen Neurone daran hindert, Substanzen zu verdauen, die normalerweise aus dem Zytoplasma herausgefischt, abgebaut und recycelt werden (siehe Kasten S. 63).

Neue Waffen gegen Krankheiten

Das Autophagie-System kann in die Zelle eingedrungene Krankheitserreger auf verschiedene Weise bekämpfen.



EN CHRISTIANSEN

Elektronenmikroskopische Aufnahmen stützen Nixons These: Bei Alzheimerpatienten stecken die Neurone im Bereich der Amyloid-Plaques voller unreifer Autophagosomen. Wie es aber im Einzelnen dazu kommt, dass sich das Material an der Außenseite der Nervenzellen sammelt, ließ sich noch nicht schlüssig nachvollziehen.

Alles in allem würde, wie es scheint, eine Intensivierung der Autophagie den Ausbruch der schwer wiegenden Alzheimersymptome vielleicht verzögern. Leider weiß niemand, ob das bei Alzheimerpatienten überhaupt etwas bringt, solange die Behandlung nicht zugleich sicherstellen kann, dass die Autophagosomen dann mit Lysosomen verschmelzen, die den Inhalt schließlich verdauen.

Die gute Nachricht lautet jedoch, dass eine solche Behandlung Huntingtonpatienten helfen könnte. Der Wirkstoff Rapamycin – auch unter dem Namen Sirolimus bekannt – scheint Autophagie zu induzieren. Er unterdrückt die Immunantwort und wird bislang eingesetzt, um die Abstoßung von transplantierten Organen – insbesondere Spendernieren – zu verhindern. Derzeit laufen Tests, ob Rapamycin die Autophagie wirksam anregen kann, um aus dem Gehirn von Huntingtonpatienten die dort typische Sorte von Proteinaggregaten zu entfernen.

Eine andere nützliche Funktion der Autophagie – Beseitigung von Zellparasiten – wurde zwar vermutet, aber erst vor recht kurzer Zeit experimentell belegt. Es geht um Erreger, welche die Zellmembran überwinden und in die Zelle eindringen. Dazu gehören bestimmte Bakterien und Einzeller (Protozoen) sowie Viren. Autophagie vermag in der Tat eine ganze Reihe Krankheitserreger zu eliminieren – so das Ergebnis mehrerer Studien, die einer von uns (Deteric) und nahezu zeitgleich zwei Forschergruppen in Japan durchführten. Eine dieser Gruppen wurde von Tamotsu Yoshimori von der Universität Osaka geleitet, die andere von Chihiro Sasakawa von der Universität Tokio. Diese Liste umfasst beispielsweise Bakterien wie den Erreger der Tuberkulose, der jährlich weltweit immerhin zwei Millionen Todesopfer fordert, und den Erreger der Bakterienruhr, aber auch ein Sporentierchen wie den Verursacher der Toxoplasmose, der unter anderem durch Katzenkot verbreitet wird (siehe Randspalte rechts).

Manche Mikroorganismen haben allerdings Gegenstrategien entwickelt und nutzen den Schutzversuch der befallenen Zellen gerade zum Überleben. *Legionella pneumophila* zum Beispiel, Erreger der Legionärskrankheit, gelangt leicht in die Zelle. Wird das Bakterium dort von einem Autophagosom verschlungen, kann es dessen Fusion mit einem verdauenden Lysosom hinauszögern oder sogar verhindern. Das infizierte Autophagosom wird zu einer ökologischen Nische, in der sich der Eindringling – unter Nutzung des eingeschlossenen Zytoplasmas als Nährstofflieferant – vermehren kann.

Allein schon die Existenz solch raffinierter evolutionärer Gegenstrategien der Zellparasiten ist ein gutes Indiz dafür, dass die Autophagie seit Langem als bedeutende Barriere gegen eindringende Pathogene und ihre Vermehrung in menschlichen Zellen fungiert. Ein Erreger muss daher »lernen« diese Barriere zu unterlaufen, um zu überleben. So überrascht es kaum, dass auch HIV, der Verursacher von Aids, sich die Autophagie für seine Zwecke zu Nutze macht. Nachgewiesen haben dies gemeinsam zwei Wissenschaftlerteams in Frankreich – eine geleitet von Martine Biard-Piechaczyk vom Forschungszentrum für Pathogene und Gesundheitsbiotechnologie in Montpellier, die andere von Patrice Codogno vom INSERM in Villejuif. Ihr Ergebnis: Das Virus, das eine bestimmte Sorte Immunzellen befällt, kann gesunde »Zuschauer« derselben Zellart in den Selbstmord treiben.

Und wie gelingt ihm das? Beim Eindringen in eine Zelle streift das Virus seine äußere Hülle ab. Deren Proteinbestandteil löst dann bei sensiblen Nachbarzellen eine überschießende Autophagie aus, die in die Apoptose mündet. Auf diese Weise dezimiert HIV auch unbefallene Abwehrzellen dieser Sorte. Der massive Verlust führt schließlich zum ausgeprägten Krankheitsbild, dem erworbenen Immunschwächesyndrom Aids.

Zuarbeiter für das Immunsystem

Eine reguläre Autophagie vermag noch mehr, als Krankheitserreger direkt zu beseitigen. Denn sie spielt auch bei der angeborenen und der erworbenen Immunität mit (siehe Kasten links). Autophagosomen helfen zum Beispiel, Erreger oder typische Moleküle davon bestimmten Rezeptoren zu übergeben – nach dem Englischen *toll-like-receptors* kurz TLRs genannt. Diese Untergruppe von Abwehrmolekülen arbeitet als eine Art Groberkennungsdienst für Erregerkategorien und steuert danach die angeborene Immunreaktion.

Ein Erreger im Zytoplasma würde den TLRs allerdings verborgen bleiben, weil deren Bindungsstelle vom Zytoplasma weggerichtet ist: Sie zeigt entweder in den Zellaußenraum oder ins Innere eines so genannten Endosoms (einer weiteren Art der membranumhüllten Bläschen im Zellinneren). Autophagosomen können nun die Erreger oder deren Bestand-

››› FORTSETZUNG AUF S. 68

AUTOPHAGIE GEGEN KEIME

Zu den Erregern, die dadurch beseitigt werden können, gehören:

- *Mycobacterium tuberculosis*, das Tuberkulosebakterium
- Vertreter der Gattungen *Shigella* (Erreger der Bakterienruhr) und *Salmonella*, die Magen-Darm-Probleme verursachen
- Gruppe-A-Streptokokken, die unter anderem Angina und Scharlach hervorrufen
- Listerien, die beispielsweise in Rohmilchkäse vorkommen und bei immungeschwächten Menschen zu tödlichen Bakterieninfektionen führen können
- *Francisella tularensis*, ein Bakterium, das die US-amerikanischen Centers for Disease Control and Prevention in Atlanta als geeignet für Bioterror-Anschläge einstufen
- *Toxoplasma gondii*, ein Protozoon (Einzeller) und einer der wichtigsten opportunistischen Krankheitserreger bei Aidspatienten

UNIVERSITÄT TÜBINGEN, FRIEDHELM ALBRECHT

INTERVIEW

VOM FORSCHUNGSLABOR ..

Wenn ein nur Fachleuten bekannter Prozess, wie die Autophagie in unseren Zellen, Gegenstand eines Spektrum-Artikels ist, verwundert das nicht –

»Wir machen am Sendetag eine Party im Labor«

ZUR PERSON

Dr. Tassula Proikas-Cezanne vom Interfakultären Institut für Zellbiologie der Universität Tübingen leitet eine eigenständige Arbeitsgruppe mit dem Schwerpunkt Autophagie. Ein Ziel: die von ihr gefundenen humanen WIPI-Proteine im Prozess der Autophagie zu untersuchen, um therapieresistente Tumorzellen wieder angreifbar zu machen.

Die Interviews führte **Claudia Eberhard-Metzger**, Wissenschaftsjournalistin mit Spezialgebiet Biomedizin.

Spektrum der Wissenschaft: Frau Dr. Proikas-Cezanne, wenn Sie jemandem in einfachen Worten erklären wollten, was Autophagie ist, wie würden Sie das anfangen?

Tassula Proikas-Cezanne: Um ins Gespräch zu kommen, würde ich es mit zwei Stichworten versuchen – zellulärer Selbstkannibalismus und zelluläres Recycling.

Spektrum: Die Zelle frisst sich selbst – klingt irgendwie selbstmörderisch?

Proikas-Cezanne: Im Gegenteil. Es ist ein evolutionär alter Überlebensmechanismus, eine Art permanentes Säubern eines Haushalts mit gleichzeitiger Renovierung. Die Zelle verdaut Zytoplasma samt Zellorganellen und verwendet die Einzelteile als Baustoffe wieder. Eine Grundreinigung muss ständig in jeder Zelle unseres Körpers erfolgen – das nennen wir basale Autophagie. Dann gibt es noch die induzierte Autophagie, eine gleichsam gezielte, bei Bedarf anlaufende Sonder- oder Spezialreinigung, um zelluläre Hungerzustände zu kompensieren. Gesteigert wird sie auch bei vielen zellulären Stresssituationen. Die durch Autophagie eingeleitete Erneuerung der Zelle ist übrigens lebenswichtig für alle so genannten eukaryotischen Organismen.

Spektrum: Und wenn unser System versagt?

Proikas-Cezanne: Dann sammeln sich Abfall und verbrauchte Zellorganellen an, und es kommt zu einer Vielzahl altersbedingter Erkrankungen, etwa Krebs, Neurodegeneration, geschwächter Immunabwehr, Muskel-, Herz- und Leberleiden. Insofern ist die Autophagie also ein Mechanismus, der uns davor schützt.

Spektrum: ... und damit natürlich ein spannendes Feld.

Proikas-Cezanne: Nicht nur deswegen. Wir kennen mittlerweile rund 30 Gene, die am Prozess der Autophagie beteiligt sind, die molekularen Details sind aber in menschlichen Zellen noch nahezu unverstanden. Hier sind Kooperationen mit weiteren Arbeitsgruppen unglaublich fruchtbar. Mit dem Team von Professor Thumm in Göttingen untersuchen wir gemeinsam Proteinfunktionen beim Anschalten der Autophagie – seine Gruppe arbeitet mit einem Hefemodell, meine mit humanen Zellen. Die Signalwege der Autophagie zu charakterisieren ist eines unserer wichtigsten Forschungsziele.

Spektrum: Auch um Krebs zu bekämpfen?

Proikas-Cezanne: Meine Gruppe sucht sogar direkt in dieser Richtung. Es sieht so aus, als ob ein Zuviel an Autophagie ein zelleigenes Selbstmordprogramm, den autophagosomalen Zelltod, einleitet. Therapieresistente Tumoren könnten daher möglicherweise wieder für Krebsmedikamente empfänglich gemacht werden, indem man die Autophagie moduliert. In einem von uns entwickelten automatisierten Verfahren prüfen wir gerade niedermolekulare Wirkstoffe auf ihre Fähigkeit, Autophagie auszulösen. Wir hoffen, dass daraus Substanzen hervorgehen, die sich als neue Medikamente gegen Krebs einsetzen lassen.

Spektrum: Demnächst, hört man, werden Sie in einem Fernseh-Tatort mitspielen?

Proikas-Cezanne: Nun ja, persönlich nicht. Die Drehbuchautorin Ingeborg Bellmann hat mich im Institut besucht und dort ausgiebig recherchiert. Ursprünglich kam das Thema Autophagie nicht im Drehbuch vor, aber ich glaube, es hat Frau Bellmann wirklich begeistert. So fand mein Lieblingsthema dann sogar Einzug in den Tatort! Auch die Schauspielerin, die die Biologin spielt, hat noch einmal mit mir Kontakt aufgenommen. Ich weiß ja nicht, was letztlich daraus geworden ist, eine Garantie für sachliche Richtigkeit kann ich also nicht geben. Aber alle hier im Labor sind schon sehr gespannt – wir machen am Sendetag eine Party und schauen uns den Film gemeinsam an.

.. ZUM FERNSEHKRIMI

wohl aber, wenn das Thema in einer »Tatort«-Folge auftaucht (am 23. 11. 2008 um 20:15 im ersten Programm). Wie kam es dazu?

»Ich bin fasziniert von Forschung«

Spektrum der Wissenschaft: Frau Bellmann, war es schwierig, einen Wissenschaftler zu finden, der Ihnen für Ihr Tatort-Drehbuch mit Rat und Tat zu Seite stand?

Ingeborg Bellmann: Um ehrlich zu sein: Ich bin fast daran verzweifelt. Alle Forscher, die ich ansprach, haben mich trotz guter Fürsprecher abgewiesen. Sie hatte alle Angst, ich würde irgendetwas mit Gentechnik machen und sie dabei an den Pranger stellen oder einen Film über Pharmaforschung drehen und sie darin verteufeln. Das war aber nie in meinem Sinn. Ich will nichts und niemanden denunzieren. Ich bin einfach nur fasziniert von Forschung.

Ich lese beispielsweise alles über Genforschung, wo immer ich Informationen darüber gewinnen kann. Und da macht man sich so seine Gedanken, wohin das in Zukunft führt, welche Risiken, aber auch welche Chancen mit der modernen Forschung einhergehen. Dort finden schließlich Entwicklungen statt, die unser aller Leben verändern werden. Aber ich bin eben keine Fachfrau. Frau Proikas-Cezanne habe ich über private Kontakte gefunden, und sie hat sich als absoluter Glückstreffer erwiesen.

Spektrum: Was wollten Sie denn wissen?

Bellmann: Ich wollte wissen, ob es grundsätzlich denkbar ist, dass man Leukämie, also Blutkrebs, auf gentechnischem Wege zunächst gezielt erzeugt – um die Erkrankung anschließend mit einer neu entwickelten Krebstherapie zu heilen, die man bei einer kleinen Versuchsgruppe testet. Auf dieser Idee basiert die Tatort-Geschichte. Ich habe mir nämlich gedacht, nehmen wir doch den Traum, dass man Krebs auf Grund molekularbiologischer Forschung eines Tages besiegen kann, einfach einmal ernst und tun so, als wäre das schon heute möglich.

Spektrum: Warum auch nicht?

Bellmann: Sicherlich, aber mir ging es in erster Linie um Plausibilität: Ist die Geschichte, die ich konstruiert habe, aus wissenschaftlicher Sicht überhaupt gedanklich möglich – oder total daneben? Dazu habe ich Frau Proikas-Cezanne angerufen, sie hat mich sehr gut beraten und gefragt, ob ich nicht einmal zu ihr ins Labor nach Tübingen kommen wolle. Dort bin ich außerordentlich freundlich und offen aufgenommen worden – trotz des dunklen Themas. Die Atmosphäre im Labor und die praktische Arbeit der Forscher haben mich begeistert. Und ich habe viel gelernt, über Krebsforschung zum Beispiel und wie man dabei vorgeht. Da waren kostbare Momente des Erlebens dabei, etwa, als ich selbst mit dem Mikroskop He-La-Zellen betrachten konnte.

Spektrum: Hat dieser Besuch im Labor Einfluss auf Ihr Drehbuch und die filmische Umsetzung gehabt?

Bellmann: Ja. Es wird jetzt im Tatort eine Szene geben, wo der Hauptkommissar auf eine Biologin trifft, die im Labor mikroskopiert. Die Biologin – sie heißt im Film Dr. Sina Fröhlich, ich habe die Figur an Frau Proikas-Cezanne angelehnt – erklärt Kommissar Ivo Batic, dass sie gerade He-La-Zellen untersucht. Das sind, so habe ich in Tübingen gelernt, Krebszellen von einer Frau namens Henrietta Lacks, die bereits 1951 in den Vereinigten Staaten an Gebärmutterhalskrebs gestorben ist. Ihre Zellen aber werden noch heute weltweit in der Forschung verwendet. Das ist doch unglaublich! Die Fernsehbiologin erläutert dem Kommissar auch das Phänomen der Autophagie und dessen Bedeutung für die Krebsentstehung.

Spektrum: Dieser Tatort hat einen etwas kryptischen Titel.

Bellmann: Sein Arbeitstitel hieß noch Versuchskaninchen.

ZUR PERSON

Ingeborg Bellmann schrieb das Drehbuch zum Tatort »Häschen in der Grube«. Die in Frankfurt lebende Hörfunkregisseurin hat Germanistik, Philosphie und Theaterwissenschaften studiert.

BAYERISCHER RUNDFUNK, BARBARA BAUREDL

Szene aus dem Tatort »Häschen in der Grube« mit krebskrankem Mädchen

Neue Waffen gegen Krankheiten

Die Autophagie in bestimmten Zellarten zu intensivieren, zu drosseln oder sonstwie zu manipulieren, könnte einmal das medizinische Arsenal erweitern. Hier sind nur einige Beispiele für mögliche therapeutische Ansätze aufgeführt.

Krankheit	Strategie	Ziel
Krebs	Autophagie in Tumorzellen unterdrücken	soll Tumorzellen daran hindern, Teile des eigenen Zytoplasmas zu verzehren und dadurch in sauerstoff- und nährstoffarmen Milieus zu überleben
Krebs	Autophagie in Zellen intensivieren, wenn hohes Krebsrisiko besteht	soll die Wahrscheinlichkeit von Mutationen und von Sekundärtumoren verringern, wenn sich infolge beeinträchtigter Autophagie DNA schädigende Moleküle in der Zelle anhäufen
Huntingtonkrankheit	Autophagie mit Hilfe von Rapamycin (Sirolimus) verstärken	soll die toxischen Proteinansammlungen entfernen helfen, die sich in den Nervenzellen anreichern
Tuberkulose	Autophagie intensivieren	soll die Erreger eliminieren helfen, die sich im Zytoplasma verbergen – sowohl bei erkrankten Menschen als auch bei beschwerdefreien Trägern

››› FORTSETZUNG VON S. 65

Vojo Deretic (links) ist Professor für Molekulargenetik und Mikrobiologie am Health Sciences Center der University of New Mexico sowie Professor für Zellbiologie und Physiologie. **Daniel J. Klionsky** (rechts) ist unter anderem Alexander-Ruthven-Professor für Lebenswissenschaften am Life Sciences Institute der University of Michigan sowie Chefredakteur der Fachzeitschrift »Autophagy«.

Deretic, V. (Hg.): Autophagy in Immunity and Infection: A Novel Immune Effektor. Wiley-VCH, Weinheim 2006.

Rubinsztein, D. C. et al: Potential Therapeutic Applications of Autophagy. In: Nature Reviews Drug Discovery 6, S. 304 – 312, April 2007.

Shintani T., Klionsky D. J.: Autophagy in Health and Disease: a Double-Edged Sword. In: Science 306, S. 990 – 995, 5. Nov. 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972371.

teile aus dem Zytoplasma fischen und einem TLR-bestückten Endosom übergeben (siehe mittlere Grafik im Kasten S. 64). Darin kommen die Erregermoleküle mit der richtigen Seite der Rezeptoren in Kontakt, und diese Bindung signalisiert der Zelle, Interferone zu produzieren. Das sind Substanzen, die zum Beispiel die Vermehrung von Erregern unterdrücken helfen. Diese angeborene Immunreaktion bekämpft die Infektion vom ersten Moment an – sie erfordert keine Vorlaufzeit, wie sie etwa für den Aufbau einer hochspezifischen, erworbenen Immunantwort benötigt wird.

Autophagosomen können aber auch zur Letzteren beitragen. Ein Beispiel: Wenn ein Virus ins Zytoplasma eindringt und die Zelle dazu zwingt, virale Proteine zu erzeugen, verschlingen die Autophagosomen ein paar davon und schleusen sie in eine andere Sorte von Endosomen ein, deren Membranen so genannte MHC-II-Moleküle enthalten. In diesem Zellabteil wird das virale Protein partiell zerlegt und ein Bruchstück davon von der Fangseite eines MHC-II-Moleküls aufgenommen, die wiederum ins Innere des Endosoms weist. Der Fang samt Leimrute wird zur Zelloberfläche transportiert, wo die Mobilmachung für eine adaptive Immunreaktion beginnt. Sie ist zwar langsamer als die angeborene, aber dafür viel spezifischer und effektiver.

Bemerkenswerterweise könnte die Autophagie auch mit der Lebensspanne eines Menschen zu tun haben. Viele Krankheiten treten mit zunehmendem Alter häufiger auf – etwa Krebs oder die Degeneration von Nervenzellen. Das liegt möglicherweise zum Teil an einer nachlassenden Autophagie. Nach gängiger Vorstellung erfahren zelluläre Systeme – einschließlich der Autophagie – mit fortschreitendem Alter einen stetigen Funktionsverlust. Vor allem die Systeme, die anomale oder funktionsgestörte Proteine und Organellen entsorgen, arbeiten immer weniger effektiv, so Ana Cuervo Maria vom Albert Einstein College of Medicine in New York. Die resultierende Anhäufung von beschädigten Zellkomponenten würde schließlich Krankheiten auslösen.

Universalinstrument statt Notnagel

Sollte wirklich eine ineffiziente Autophagie daran schuld sein, würde das laut Cuervo erklären, warum eine reduzierte Kalorienaufnahme im Tierexperiment die durchschnittliche Lebenspanne verlängert. Je geringer die Nahrungsmenge (vorausgesetzt, sie enthält alle essenziellen Nährstoffe und unterschreitet kein absolutes Limit), desto länger leben die Tiere. Das Gleiche könnte für Menschen gelten.

Eine reduzierte Nahrungsversorgung – gleichbedeutend mit drohendem Verhungern – veranlasst bekanntlich Zellen, ihre Autophagie hochzufahren. Somit dürfte eine Kalorienreduktion den altersbedingten Rückgang der Autophagie teilweise aufheben und folglich den ständig nötigen Aufräumprozess der Zellen auf einem hohen Niveau halten. Außerdem, so Cuervo, hätten neuere Forschungen gezeigt: Gelingt es bei Versuchstieren, den altersbedingten Rückgang der Autophagie zu unterdrücken, dann lässt sich oft auch die typische Anhäufung von Proteinen vermeiden, die durch Reaktionen mit reaktiven Sauerstoffspezies geschädigt wurden.

Einst sahen Forscher die Autophagie hauptsächlich als Notnagel, der den Zellen Hungerphasen zu überbrücken hilft. Heute wissen wir: Der Prozess beeinflusst in zentraler Weise zahlreiche Faktoren, die sich auf Gesundheit und Krankheit des Menschen auswirken. Die einschlägige Forschung fächert sich derzeit in neue, unerwartete Richtungen auf und liefert einen exponentiell wachsenden Fundus wissenschaftlicher Erkenntnisse. Dabei stehen wir erst am Anfang. Es gilt Wege zu finden, die Autophagie gezielt zu drosseln oder zu beschleunigen. Hier bieten sich viel versprechende therapeutische Möglichkeiten und vielleicht sogar die Chancen, den natürlichen Alterungsprozess zu verlangsamen. Allerdings brauchen wir dazu erst ein weit umfassenderes Verständnis der Mechanismen und der komplizierten biochemischen Signale, von denen die Autophagie abhängt. ◁

Wegen totaler Überfischung drohen die größten Tunfischarten, die Roten oder Blauflossentune, zu verschwinden.

AP PHOTO, CHRIS PARK

Fischfarmen zur Rettung von Tunfischen?

Delikate Gerichte wie Sushi machen dem Roten Tun den Garaus. Überleben kann der Riesenfisch wahrscheinlich nur durch Massenzucht in Gefangenschaft.

Von Richard Ellis

Es gibt ganz verschiedene Tunfische. Konserven enthalten meist das eher helle Fleisch von den kleineren Arten wie dem einen Meter langen Bonito oder dem fast eineinhalbmal so großen Weißen Tun – beides weltweit verbreitete, von der Fischindustrie in rauen Mengen verarbeitete Räuber. Zu Steaks dienen gewöhnlich Gelbflossen- und Großaugentune, die bis rund 200 Kilogramm wiegen und an die zweieinhalb Meter lang werden. Aber für die modischen japanischen Rohfischgerichte, Sushi und Sashimi, gelten als erste Delikatesse die riesigen Blauflossentune mit ihrem dunklen Fleisch, darunter allen voran der Gewöhnliche Tunfisch. Hauptsächlich diese Art heißt wegen der Farbe ihres Fleisches auch Roter Tun.

Mit an die 700 Kilogramm und viereinhalb Meter Länge gehört sie zu den größten Fischen überhaupt. Leider avancierte der Rote Tun in den letzten Jahren außerdem zum begehrtesten Speisefisch der Welt – und damit zugleich an die Spitze einer anderen Rangliste: Er dürfte inzwischen die am stärksten bedrohte große Fischart darstellen. Rote Tunfische leben im nördlichen Atlantik und im Mittelmeer, ein etwas kleinerer Blauflossentun ist in Teilen des Pazifiks zu Hause, eine dritte Art in den südlichen Meeren (siehe Kasten S. 75). Manche bezeichnen auch diese Arten als Rote Tunfische. Der Fischhandel macht zwischen ihnen nicht viel Unterschied. Wahrscheinlich können wir ihr Aussterben durch maßlose Überfischung nur noch verhindern, wenn es gelingt, diese anspruchsvollen Raubfische zu domestizieren, also für kommerzielle Zwecke in Gefangenschaft zu züchten.

Die Gewöhnlichen Tune gehören zu den ganz wenigen warmblütigen Fischen – die somit nicht wie die meisten Fische ihre Umgebungstemperatur annehmen. Sie heizen sich mit ihren Muskelpaketen ein. Tauchen sie zum Beispiel 1000 Meter tief in Zonen, wo oft nur 5 Grad Celsius herrschen, können sie trotzdem eine Körpertemperatur von 27 Grad bewahren – fast auf dem Niveau von Säugetieren. Zudem zählen diese Tune zu den schnellsten Fischen und besten Schwimmern überhaupt. Sie schaffen Spitzengeschwindigkeiten von 80 Stundenkilometern und durchqueren in ein paar Wochen ganze Ozeane. In den 1990er Jahren diente der Rote Tunfisch Forschern denn auch als Modell für einen ausgeklügelten Schwimmroboter, einen dicken, spindeligen mechanischen Fisch mit sichelförmiger Schwanzflosse (Spektrum der Wissenschaft 8/1995, S. 66). Dabei kam heraus, dass Tune mit raschen Schwanzschlägen gegenläufige Wasserwirbel und somit einen Schub erzeugen, der sie vorantreibt. Allerdings konnte der Roboter das nicht entfernt so gut wie das Vorbild.

Rote Tunfische jagen, wie Wölfe, gern im Verband. Sie kesseln die Beute ein, indem sie sich ihr rasend schnell im Halbkreis nähern und sie dann umschließen. Obwohl ihr Stoffwechsel an die Hochgeschwindigkeitsjagd angepasst ist, fressen Tunfische je nach den Umständen alles, was sie an Tieren finden, bald

In Kürze

- Die Arten der riesigen Blauflossentunfische drohen auszusterben. Offizielle Stellen haben ihre **Überfischung** durch lasche Vorgaben nicht verhindert. Vor allem aber treibt der gewinnträchtige Sushi-Markt den illegalen Fang in die Höhe.
- Nur **Zuchtbetriebe** scheinen diese Tunfische noch retten zu können. Die Tiere in Gefangenschaft zur Vermehrung zu bringen, ist allerdings schwierig. Doch mittlerweile melden Forscher die ersten wirtschaftlich ausbaufähigen Zuchtstrategien.

STECKBRIEF

Der Rote oder Gewöhnliche Tun, *Thunnus thynnus*, ist **eine Fressmaschine**, vorzüglich dafür gemacht, in kalten Ozeangebieten gemäßigter Zonen zu jagen.

Der **angeblich größte Tunfisch** wurde 1979 vor Nova Scotia gefangen. Er wog 679 Kilogramm. Üblicherweise wiegen erwachsene Rote Tune halb so viel. Sie sind dann rund zwei Meter lang.

In kurzen Spurts erreichen diese Fische eine **Spitzengeschwindigkeit von 80 Stundenkilometern**. Den Atlantik durchqueren sie in weniger als zwei Monaten.

Die Weibchen produzieren **pro Jahr bis zu zehn Millionen Eier**. Die Larven sind beim Schlüpfen drei Millimeter lang. Sie wachsen einen Millimeter am Tag.

Die Fische können **dreißig Jahre alt** werden. Aber nur einer von 40 Millionen junger Tunfische wird erwachsen.

Im Jahr 2001 wurde ein 200-Kilogramm-Tun in Japan für 173 600 Dollar gekauft – **Kilopreis: 868 Dollar**.

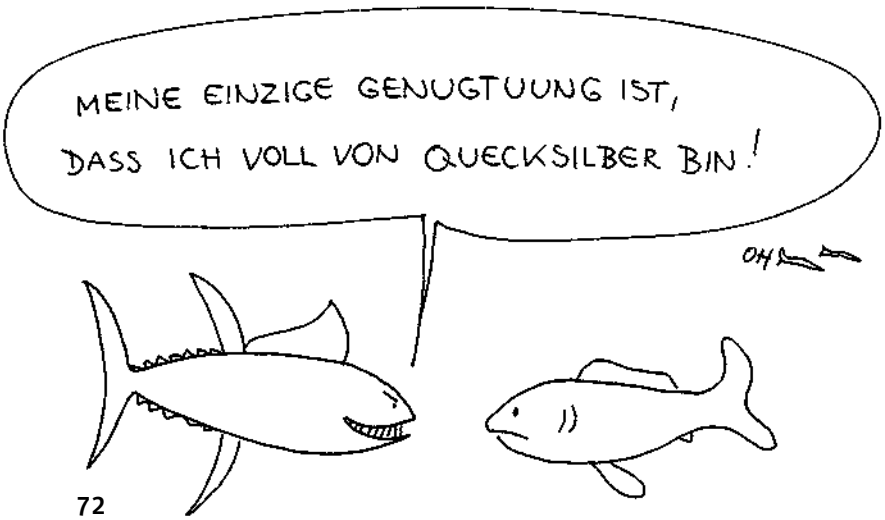
flinke Makrelen, bald am Grund lebende Flundern, ja sogar Schwämme. Bradford Chase von der Massachusetts Division of Marine Fisheries fand in den Mägen von Tunfischen aus dem Meer bei New England an erster Stelle Heringe, aber auch vielerlei andere größere und kleine Fische, von Haien bis zu Seepferdchen, von Rochen bis zu Plattfischen sowie die verschiedensten Tintenfische, Krebse und mancherlei anderes Getier. Kurz: Tunfische nehmen, was sie erwischen, und sie erwischen fast alles, was da im Wasser oder am Boden schwimmt oder treibt, krabbelt oder haftet. Dafür benutzen sie hauptsächlich ihren Gesichtssinn.

Nicht immer galt der Rote Tun als Delikatesse. Vor 100 Jahren wurde sein streng schmeckendes Fleisch höchstens Hunden oder Katzen zugemutet. Doch dann entdeckten Abenteurer als neuen exotischen Hochseesport vor Nordamerikas Küsten das Angeln auf Riesenfische. Von denen fanden damals einzig Schwertfische auf die Tafel der Menschen. Marline und Tunfische mussten als reine Jagdobjekte herhalten, an denen die Männer ihr Geschick und ihre Kräfte maßen.

Zu einem Speisefisch – und einer begehrten Delikatesse – wurde der Rote Tun erst in den letzten 50 Jahren, denn nun gewannen die pikanten Sushis zunächst in Japan und später weltweit Liebhaber. Anders, als viele sicherlich annehmen, gehörte roher Fisch in Japan früher keineswegs zur landestypischen Kost. Vielmehr pflegte man die schnell verderbliche Nahrung aus dem Meer, in Japan die Hauptproteinquelle, zum Beispiel durch Pökeln, Marinieren oder Räuchern haltbar zu machen.

Die Situation änderte sich aber, als nach dem Zweiten Weltkrieg Kühl- und Gefrierschränke ins Land kamen. Eingefroren blieb roher Fisch nun fast unbegrenzt wie frisch, was die Ernährungsgewohnheiten der Japaner grundlegend veränderte. Ein Übriges bewirkten Neuerungen der Fischereiindustrie – wie das Langleinenangeln mit oft viele Kilometer langen Kunststoffseilen, bestückt mit Tausenden beköderter Haken, oder der so genannte Ringwadenfang, bei dem eine Anzahl Boote mit zusammengelegten Riesennetzen ganze Fischschulen absammelt. Außerdem froren die Fischer ihre Beute nun gleich auf den Schiffen ein.

Alsbald machten die Blauflossentunfische in Japan Karriere: Von unreinen Tieren, die ein Samurai früher nicht angerührt hätte, avancierten sie rasch zur Sushi-Delikatesse Maguro. Die kann so viel kosten wie Trüffel oder Kaviar. Das beste Maguro heißt Toro. Es stammt vom fetten Bauchfleisch eines erwachsenen Blauflossentuns. Kaviar und Trüffel sind rar und darum kostbar. Doch die großen Tunfische tummelten sich im Meer damals noch in Scharen. Binnen kurzer Zeit fand Maguro auch in anderen Ländern Aufnahme in gehobene Menüs. Auf dem Tokioter Tsukiji-Fischmarkt erzielte ein Tier im Jahr 2001 den Preis von 173 600 US-Dollar.



BEIDE FOTOS: NATURE PICTURE LIBRARY, NEIL LUCAS

Besonders katastrophal ist die Situation im Mittelmeer, wo die Tunfischbestände hoffnungslos ausgebeutet werden. Hier bringt eine Fischereiflotte vor Südspanien größere Mengen zur Strecke (links) und an Land (rechts).

In Amerika war der Verzehr von Rohfisch vor 40 Jahren noch undenkbar. Heute gibt es Sushi und Sashimi fast in jedem Feinkostladen, aber sogar auch im Supermarkt – und selbstverständlich in edlen Restaurants. Einer der grandiosesten Sushi-Tempel könnte das Masa in New York sein. Der Japaner Masayoshi Takayama eröffnete das teuerste Restaurant der Stadt im Jahr 2004. Ein Essen für zwei Personen kostet dort leicht über 1000 Dollar.

Ignoranz der Verantwortlichen

Dass ein Fisch die Fangflotten anzieht, wenn schon eine Scheibe von seinem Fleisch mehrere hundert Dollar einbringt, leuchtet ein. So verwundert es nicht, dass das Geschäft damit aufblühte und die Tunfischjagd rasch weltweit große Ausmaße annahm. Anfänglich hatten sich die Japaner in ihren eigenen Meeren am Pazifischen Blauflossentunfisch *(Thunnus orientalis)* bedient. Sie merkten aber schnell, dass im nördlichen Atlantik größere Tune vorkommen als im Pazifik und dass sie dort zahlreicher auftreten. In ostamerikanischen Fischereihäfen wie Gloucester und Barnstable in Massachusetts wurden die Einkäufer japanischer Fischimporteure bald zum vertrauten Anblick, wie sie den Fettgehalt von in Mengen angelandeten Prachtexemplaren prüften, um sie dann vom Fleck weg zu kaufen und gleich weiter nach Japan zu verschiffen.

Noch vor ein paar Jahrzehnten herrschte die Ansicht, der Rote Tun *(Thunnus thynnus)* bilde zwei getrennte Populationen. Eine laichte angeblich im Golf von Mexiko ab und lebte sonst im westlichen Atlantik. Die andere Population, so glaubte man, suchte zur Fortpflanzung das Mittelmeer auf, hielt sich aber in der übrigen Zeit im östlichen Atlantik auf. Diese Verhältnisse legte die 1969 eingesetzte Kommission ICCAT (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas) zu Grunde, als sie Fangquoten für den Roten Tunfisch festsetzte. Nur für den Westatlantik, wo die Art schon in den 1970er Jahren selten wurde, forderte sie strikte niedrige Quoten. Für die östlichen Regionen setzte sie viel großzügigere Fangmengen an.

Dabei hatten Frank J. Mather und Francis G. Carey von der Woods Hole Oceanographic Institution (Massachusetts) schon in den 1950er und 1960er Jahren mit markierten Tieren Hinweise gesammelt, dass die Roten Tune gar nicht völlig getrennte Populationen bilden. Diesen Verdacht konnte Barbara A. Block von der Stanford University (Kalifornien) vor einigen Jahren bestätigen. Demnach benutzen diese Fische zwar wirklich entweder den Golf von Mexiko oder das Mittelmeer zum Laichen, jedoch überlappen sich die Jagdgebiete der beiden Populationen im Atlantik. Manche Tiere schwimmen durchaus quer durch den Ozean. Weil aber die Ausbeutung der großen Tunfische im Ostatlantik, gestützt auf die Empfehlungen der ICCAT, weiterging, brachen schließlich die Bestände im gesamten Atlantik ein.

Sofern überhaupt möglich, stellt sich das Desaster im Mittelmeer noch schlimmer dar.

Der Verdacht stimmte: Im ganzen Altantik brachen die Bestände ein, weil sich die Populationen mischen

Auf dem Tsukiji-Großmarkt in Tokio prüfen Fischkäufer die Fleischqualität angelieferter gefrorener Tunfische.

MIT FRDL. GEN. VON RICHARD ELLIS

SUSHI

Der Hauptgrund für die Überfischung ist die schier unersättliche Nachfrage nach **Sashimi**, rohen Fischscheiben, und **Sushi**, mit Fischstückchen belegtem oder umwickeltem Reis.

Im 4. vorchristlichen Jahrhundert begannen Menschen in Südostasien **Fisch haltbar** zu machen, indem sie kleine Stücke in Reis packten, der dann fermentiert wurde. Das Verfahren gelangte im 8. nachchristlichen Jahrhundert nach Japan.

Im 19. Jahrhundert kam an den Marktständen von Edo, dem heutigen Tokio, die Mode auf, Fisch roh zu essen, als **Nigiri Sushi**. Doch erst nach dem Zweiten Weltkrieg, seit viele Haushalte Kühlschränke besitzen, wurde die Speise allgemein beliebt.

Seit einigen Jahrzehnten erobert Sushi zunehmend auch andere Länder. Allerdings servieren nur **Edelrestaurants** Fleisch der Blauflossentune. Ansonsten enthalten die Leckereien meist Fleisch kleinerer Tunfischarten – die allerdings ebenfalls bedroht sind. Nach wie vor werden die meisten Blauflossentune in Japan verzehrt.

Dort haben die Fischer eine Vorgehensweise der Südaustralier übernommen, die den Südlichen Blauflossentun *(Thunnus maccoyii)* fangen. Ganze Schulen junger, noch nicht geschlechtsreifer Tunfische werden in große Treibnetze getrieben und dann zu Meeresfarmen geschleppt. Dort mästet man sie bis zur Schlachtreife, sticht sie ab und schickt die Ausbeute nach Japan. Die Mittelmeerfischer dürfen zu kleine Tune nur nicht dem Meer entnehmen. Doch es gibt keine Vorschrift, die deren Fang und Aufzucht in solchen Fischfarmen untersagt. Bis auf die Israelis nutzen Menschen sämtlicher Anrainerstaaten das Schlupfloch: in Spanien, Frankreich, Italien, Griechenland, der Türkei, Zypern, Kroatien, Ägypten, Libyen, Tunesien, Algerien, Marokko und Malta. Sie holen Hunderttausende der jungen Tune in die Mastbetriebe.

Naiverweise galten die Tunfischfarmen anfangs als pfiffige Lösung gegen die Überfischung. In Wahrheit eignet sich diese Methode bestens, um einen Fischbestand zu ruinieren: Denn die Jungfische werden ja vor der Brutreife abgefischt, und erwachsene Tiere, die für Nachwuchs sorgen könnten, wachsen so kaum noch heran. In den Netzbassins pflanzen sie sich nicht fort, und dann werden sie geschlachtet. Somit treiben solche Farmen die Ausrottung nur umso stärker voran.

Der WWF (World Wide Fund for Nature) forderte 2006, im Mittelmeer müsse die Tunfischjagd völlig aufhören. Dass dies angesichts der Gewinnlage in dem Geschäft nichts fruchtete, kann man sich ausrechnen. Die ICCAT ignorierte auf ihrer Tagung im November 2007 die Naturschutzargumente und legte für 2008 wiederum ähnliche Fangquoten wie für 2007 fest. Die Kommission stimmte lediglich zu, die Fangmengen bis 2010 um 20 Prozent zu verringern und später noch mehr zu reduzieren. Der Vorstand der US-Delegation sprach von halbherzigen Maßnahmen. Er warf der ICCAT vor, sie würde ihrer Aufgabe nicht gerecht. Nun musste der Tunfischfang im Mittelmeer in diesem Sommer, 2008, wegen der katastrophalen Situation schon im Juni eingestellt werden.

Hemmungslose Profitgier

Doch auch deutlich niedrigere offizielle Fangquoten würden wenig retten können. Zu viel geschieht auf diesem Feld illegal und unter der Hand. Fischereiflotten hintergehen in großem Maßstab Regularien und Kontrollen aller Art, ob das Fangmengen, zeitliche oder räumliche Vorgaben und sonstige Vorschriften betreffen mag. Über drei Viertel der weltweit gefangenen Blauflossentunfische, rund 60 000 Tonnen im Jahr, landen allein auf dem japanischen Markt – aus welchen Quellen das heiß begehrte Fleisch stammt, spielt keine Rolle.

Japanische Fischer umgehen sogar ihre landeseigenen Bestimmungen. Sie bringen jedes Jahr tausende Tonnen illegal gefangene Tiere an Land und fälschen die Papiere und Logbü-

cher. Natürlich wäre es wünschenswert, solch hemmungslose Profitgier auszumerzen – nur hieße das, die Natur des Menschen grundlegend zu ändern. Tatsache ist, dass die Tunfischpopulationen immer weiter zurückgehen, während die Nachfrage nach Toro, der Höchstqualität, steigt. Die immer rarere Ware wird die Preise noch weiter in die Höhe treiben. Das wiederum wird die Fischerei noch mehr anstacheln. Solche Szenarien wären obsolet, würden sich die Japaner abgewöhnen, derart scharf auf Toro zu sein. Allerdings könnte man genauso gut die Amerikaner bitten, auf Hamburger zu verzichten. Vermutlich bleibt nur eine Lösung: Tunfische in Gefangenschaft züchten.

Der Meeresbiologe John Marra von der Columbia University (New York) veröffentlichte im Juli 2005 in der Fachzeitschrift »Nature« einen Beitrag mit dem Titel: »When will we tame the oceans?« (»Wann werden wir die Ozeane zähmen?«). Er schrieb, die Befischung der Meere sei nicht mehr nachhaltig. Weltweit seien wir damit gescheitert, den Fischfang sinnvoll zu managen. Darum könnte es in ein paar Jahrzehnten nichts mehr zu managen geben (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 95).

Aquakultur für den König der Meere

Als Ausweg schlägt Marra vor: Man müsse den Ozean, besser gesagt seine begehrten Bewohner domestizieren, das heißt in großem Umfang so genannte Marikultur betreiben. Fischfarmer sollen wirtschaftlich wertvolle Arten in Gefangenschaft sowohl züchten als auch aufziehen als schließlich auch »ernten«. Der Forscher räumt ein, dass bestehende Meeresfarmen der Umwelt schaden, denn sie verdrecken Ökosysteme von Küsten und schwächen die erschöpften Wildfischpopulationen mit Krankheiten und Schadstoffen noch mehr. Das ließe sich aber mit so genannten Offshore-Farmen umgehen oder wenigstens erheblich reduzieren, die weit im Meer liegen, mindestens über den äußeren Kontinentalschelfen. Außerdem müssten die Gehege wesentlich größer ausgelegt sein als heute üblich. Sie sollten schon 100 000 Kubikmeter Wasser umfassen. Auch müssten die Netzkonstruktionen rundum, selbst oben, geschlossen und so konzipiert sein, dass die Anlage ein Stück unter der Wasseroberfläche liegen sowie fortbewegt werden kann.

Was die Tunfische betrifft, stellte sich Marra vor, dass Meeresfarmer Schwärme einfangen, die sie dann längere Zeit nach Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit in großen Gehegen halten und versorgen. Zum Fangen könnten sie eine bewährte Methode der Fischer anwenden, die Tunfische mit ungewöhnlich gestalteten Objekten, zum Beispiel Bojenkonstruktionen, anlocken, unter denen die Tiere sich versammeln. Je nach Bedarf würde zu verschiedenen Zeiten ein Teil der Farmfische abgeschlachtet, ähnlich wie Bauern mit ihren Viehbeständen verfahren – während sich die Fischindustrie heute auf die Ablaichphasen konzentriert.

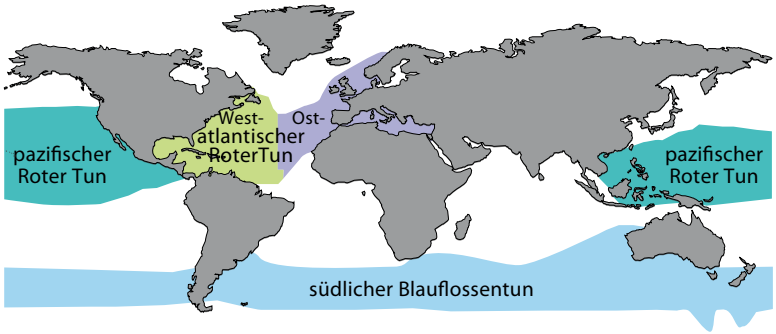
Doch solange es nicht gelingt, die sensiblen Blauflossentunfische wirklich wie Haustiere zu halten, also in Gefangenschaft in Herdenhaltung auch regelmäßig und in großem Umfang nachzuzüchten, ist abzusehen, dass ihre Popu-

Ausrauben ohne Mass

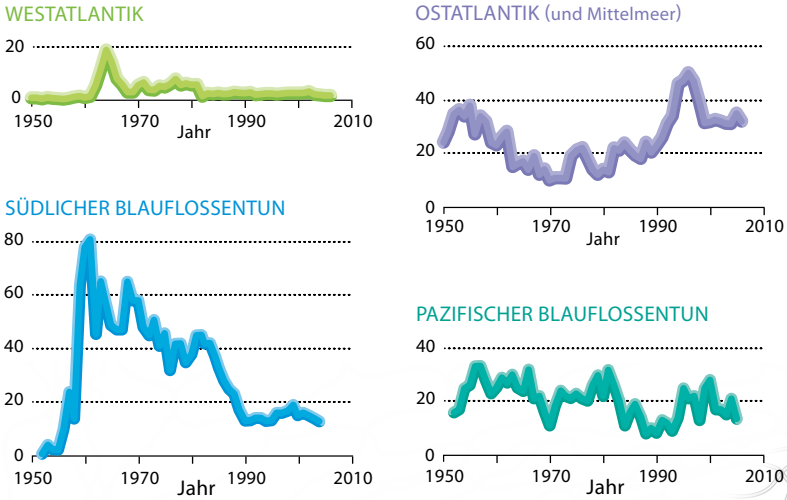
Alle Bestände der Blauflossentunfische sind so stark überfischt, dass sie auszusterben drohen. Besonders katastrophal stellt sich die Situation für die westliche Population des atlantischen Roten Tuns dar. Für diese Region sind seit 1981 zwar recht niedrige Fangquoten festgelegt. Aber die Tiere ziehen auch in den Ostatlantik, wo zehnmal so viel gefischt werden darf. Wahrscheinlich beträgt die Westpopulation heute weniger als ein Fünftel derer vor 30 Jahren.

Zum drastischen Rückgang der Tunfische tragen wesentlich auch illegale Praktiken bei. Experten schätzen, dass die auf solchen Wegen erzielten Fangmengen im Ostatlantik und Mittelmeer nochmals genauso hoch sind wie die offiziell verbuchten, welche die Grafiken unten zeigen.

Verbreitung der drei Blauflossentunfischarten



Blauflossentunfische: Fangmenge in tausend Tonnen



LUCY READING-IKKANDA, NACH: FISHERIES AND AQUACULTURE DEPARTMENT / FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO) OF THE UNITED NATIONS

So werden junge Tunfische, rund 250 Tier pro Umfriedung, oft weite Strecken zu Fischfarmen geschleppt – hier nach Sizilien. Die verbreitete Praxis dezimiert die Bestände in der Natur dramatisch bis aufs Letzte.

GETTY IMAGES / AFP, GAVIN NEWMAN

Eine Mastfarm mit Pazifischen Blauflossentunfischen vor Ensenada, Mexiko, deren Fleisch später von Los Angeles nach Japan geflogen wird

AP PHOTO, CHRIS PARK

Auch diese Tunfische in einem Aufzuchtbehältnis vor Kroatien in der Adria sind für Japan bestimmt.

GETTY IMAGES / AFP

lationen immer mehr zusammenbrechen. Jenes große Ziel fordert die Experten gewaltig heraus. Auch die EU unterstützt solche Forschungen, und in jüngster Zeit vermelden die Meeresbiologen, die vielfach international zusammenarbeiten, erste Erfolge in größerem Maßstab. So gelang es vor wenigen Monaten, mit Beteiligung von Forschern der Universität Düsseldorf, im süditalienischen Mittelmeer gehaltene Tunfische mit einer Hormonbehandlung zur Fortpflanzung zu bringen. Die Meeresbiologen erhielten eine große Anzahl Larven, die nun aufgepäppelt werden.

Eines der führenden Unternehmen, die eine kommerzielle Tunfischzucht entwickeln, ist Clean Seas Aquaculture Growout von der Stehr Group in Port Lincoln (South Australia), die ebenfalls zunehmend auf internationale Forschungskooperation setzt und mit den europäischen Experten zusammenarbeitet. Von dort kamen schon in diesem Frühjahr Erfolgsmeldungen. Die australische Regierung unterstützt das Vorhaben von Clean Seas mit 4,1 Millionen australischen Dollar (3,4 Millionen US-Dollar). Die Zucht der riesigen Gelbschwanzmakrelen *(Seriola lalandi)* und Adlerfische *(Argyrosomus hololepidotus)* gelang der australischen Firma schon vor einigen Jahren. Sie produziert diese Tiere bereits in erheblicher Menge für den Markt.

Für die Tunfische hat Clean Seas eigens ein Drei-Millionen-Liter-Bassin gebaut, das optimale Bedingungen bieten soll bis hin zu vorgetäuschten Jahreszeiten. Seit Oktober 2006 leben darin geschlechtsreife Südliche Blauflossentune. Unternehmensgründer Hagen Stehr sagte damals in einem Zeitungsinterview: »Alles Nötige steckt im Computer. Wir können es den Fischen heller oder dunkler machen. Wir können alles so einrichten, dass sie sich wohl fühlen. Wir lassen auch die Sonne auf- und untergehen …«

Im Februar 2007 durfte ich den Betrieb unter strengen Auflagen besuchen. Rob Staunton, der Leiter, fährt mit mir zur Arno Bay am Westufer des Spencer-Golfs 120 Kilometer nördlich von Port Lincoln. Man hatte mir zugesagt, abgesegnet von Stehr persönlich, dass mir eingeschränkt Zutritt in den Gral – zu dem Riesentank – gewährt würde. Fotografieren darf ich im Innern nicht. Alles hier ist Betriebsgeheimnis – von der Konstruktion und Handhabe der Technik über die Wasseraufbereitung bis zur Klimatisierung. Damals gab es noch einen Wettlauf mit Teams der japanischen Kinki-Universität in Higashi-Osaka, die im Aquarium schon Tunfische züchteten, wenn auch nicht im Großmaßstab. Inzwischen arbeiten Forscher beider Einrichtungen zusammen.

Gleich beim Eintritt schlüpfen Staunton und ich in sterilisierte weiße Gummischuhe. Keinesfalls dürfen wir Krankheitskeime hineintragen. Bevor wir das Heiligtum betreten, von nun an unter Aufsicht des leitenden Mitarbeiters Thomas Marguritte, wechseln wir nochmals die Schuhe. Diesmal sind sie blau. Wir kommen in einen großen, höhlenartigen Raum, den viele Lichtröhren schwach erhellen. Bis auf die leise summende Klimaanlage ist es still. Nun erklimmen wir den Betonrand des Riesenbeckens und blicken ins scheinbar ruhige Wasser hinunter.

Das Behältnis misst im Durchmesser vielleicht 25 Meter und ist 6 Meter tief. Bei der schwachen Beleuchtung erkennen wir nicht viel. Doch sobald Marguritte ein paar kleine Fische hineinwirft, zerspringt die Wasseroberfläche, und es blitzt blau und silbern. Schon schäumt das Becken von den vielen sichelförmigen Rücken- und Schwanzflossen der gierigen Insassen. Dabei wurden sie, wie ich erfahre, gerade vor einer Stunde gefüttert. Die schnittigen Bestien, die wild unter uns kreisen, erinnern an blanke Torpedos. Sie mögen 300 Kilogramm wiegen. Zur hinteren Körperspitze führt an Bauch und Rücken eine Linie gelb leuchtender falscher Flossen. Die Seitenflossen dieser Art leuchten chromgelb. Bei den nördlichen Arten sind sie schwarz. Von der Größe her sind diese Tiere geschlechtsreif, jedoch ist ihr Geschlecht äußerlich nicht erkennbar.

»Nicht ob, sondern wann«

Während wir den Fischen zusehen, reden wir über das Zuchtprogramm. »Die natürlichen Verhältnisse von indonesischen Gewässern, wo die Tiere nach unserer Kenntnis ablaichen, können wir genau nachahmen«, erzählt Marguritte. »Sagen wir, dort laichen sie im Frühsommer ab, so um den 20. November, wenn die Tage lang sind und das Wasser warm ist. Also bieten wir ebendiese Bedingungen auch unseren Fischen. Wir regeln entsprechend die Lichtdauer, die Luft- und Wassertemperatur und sogar die herrschende Strömung.« Als kritischer Faktor galt damals die geringe Wassertiefe in dem Becken, denn vor den Indonesischen Inseln, wo diese Art sonst ablaicht, liegt der fast acht Kilometer tiefe Sundagraben, die tiefste Stelle des Indischen Ozeans. Dieser Sorge sind die Forscher jetzt enthoben. Die zunehmend verbesserten Haltungsmethoden und Rahmenbedingungen führten, wie gesagt, zu ersten Erfolgen.

Anschließend treffe ich den geschäftsführenden Direktor, den 42-jährigen Marcus Stehr, Sohn des Firmenchefs. Am Vortag hatte er eine Flotte von Ringwadenbooten in der Großen Australischen Bucht vor der Südküste besucht, die sich daranmachten, in ihrem gemeinsamen Riesennetz ungefähr 100 Tonnen Tunfisch nach Port Lincoln zur Farm zu bringen. Auch Marcus Stehr äußert sich begeistert und sehr optimistisch zu dem Projekt. Ob ein Durchbruch wohl die Haltung der Australier gegenüber dem Tunfisch ändern würde? Dazu sagte er damals nur: »Nicht ob, sondern wann.«

Ob die Blauflossentunfische überleben, dürfte von solchen Zuchtbemühungen abhängen. Der Hochseeangler nimmt den Tun als kräftigen, gewandten Gegner wahr, ein Harpunier als schillernden Schatten, der mit starken Schwanzschlägen zu entkommen sucht. Ein Ringwadenfischer erlebt ein wildes Gewusel silber-blauer Körper. Langleinenfischer sehen erst die an Bord geholten toten Tiere. Für den Tunfischfarmer handelt es sich um namenlose Kreaturen, die schlachtreif gemästet werden müssen. Der Auktionator auf dem Tsukiji-Fischmarkt in Tokio hat eine lange Reihe gefrorener Blöcke in Tunfischform ohne Schwanz vor Augen. Und japanische Konsumenten schauen auf ein Scheibchen rohes, rotes Fleisch, Toro.

Für Biologen stellt ein Roter Tunfisch ein Wunder an Hydrodynamik dar, das alle anderen Fische in so vieler Hinsicht übertrumpft: beim Fressen, in der Größe, in der Geschwindigkeit, beim Tauchen, bei Fernwanderungen. Wer nicht möchte, dass *Thunnus thynnus* ausstirbt, der wird sich wohl daran gewöhnen müssen, dass diese einzigartigen Fische zukünftig wie Schafe oder Kühe gehalten werden – als domestizierte Tiere.

Vielen mag diese Vorstellung schmerzlich sein. Sie werden diese Kraftpakete, diesen Inbegriff eines großen Raubfischs, nicht zum Haustier machen wollen. Doch andernfalls droht den Blauflossentunen – und der Maguro-Industrie – eine düstere Zukunft. ◁

AP PHOTO / GREENPEACE, HO

Während der Konferenz des ICCAT im November 2007 in der Türkei demonstrierten Greenpeace-Aktivisten am türkischen Mittelmeer. Sie forderten, die Jagd auf den Roten Tun im Mittelmeer völlig einzustellen. Doch die ICCAT beschloss nur, die Fangquoten im Lauf der nächsten Jahre langsam etwas zu senken.

Richard Ellis zählt zu den führenden amerikanischen Meeresschützern. Unter anderem schrieb er ein Buch über Wale und eines über Haie. Derzeit verfasst er ein Buch über Tunfische. Er berät die amerikanische Gesellschaft für Wale und arbeitet als Forscher am American Museum of Natural History in New York.

Ellis, R.: Der lebendige Ozean. Nachrichten aus der Wasserwelt. marebuchverlag, Hamburg 2006.

Issenberg, S.: The Sushi Economy. Gotham Books, New York 2007.

Volpe, J. P.: Dollars without Sense: The Bait for Big-Money Tuna Ranching around the World. In: Bioscience 55(4), S. 301–302, 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972372.

WANN *regierte* ECHNATON?

Drei Jahrtausende lang herrschten Pharaonen über Ägypten, angefangen vom mythischen König Menes bis hin zur griechischen Ptolemäer-Dynastie. Ihre Abfolge als Grundgerüst einer Chronologie des Nilstaats zu ermitteln erfordert jedoch detektivischen Spürsinn und Geduld. Antike Königslisten, Briefwechsel, astronomische Beobachtungen und anderes mehr, sorgfältig miteinander verknüpft, liefern Hinweise auf Regenten und Regierungszeiten. Lässt sich die Titelfrage mit diesem Vorgehen immerhin auf Jahrzehnte genau beantworten – Echnaton regierte vermutlich im 14. Jahrhundert v. Chr. –, sind bei späteren Königen wie Psammetich II., einem Pharao des 6. Jahrhunderts, sogar auf den Tag genaue Angaben möglich. Mag im Detail noch manche Verbesserung nötig sein, hat sich doch eine verlässliche Chronologie Ägyptens etabliert, schreibt der in Amerika lehrende Ägyptologe Leo Depuydt. Gerade das aber stellen der englische Historiker Peter James und der Bibelarchäologe Peter van der Veen in Frage und fordern eine Korrektur um bis zu 200 Jahre (siehe den folgenden Beitrag ab S. 88).

Von Leo Depuydt

Angriff ist die beste Verteidigung! Gut sechs Jahrzehnte waren vergangen, seit Psammetich I., Fürst von Sais (heute Sa el-Hagar) im Nildelta, die nubischen Fremdherrscher vom Pharaonenthron vertreiben konnte. Doch nach wie vor befürchtete Ägypten einen Angriff Nubiens. Im Jahr 593 v. Chr. rüstete sein Enkel Psammetich II. zum Präventivschlag, zerstörte und plünderte die Städte des südlichen Nachbarlandes, um dem Feind jede weitere Operationsbasis zu nehmen. Im Jahr darauf unternahm der ehrgeizige junge Pharao eine Reise nach Palästina, das zum neubabylonischen Reich gehörte. Um außenpolitische Beziehungen zu verbessern, glauben manche, um den judäischen König zu einer Revolte anzustacheln und den Einflussbereich Ägyptens so wieder zu erweitern, vermuten andere. Doch zwei Jahre später erlag der Pharao einer Krankheit. Mögen wir über die politischen Ambitionen Psammetichs II. nur mutmaßen können, das Datum seines Todes ist gewiss: 9. Februar 589 v. Chr.

Wie ist es möglich, dass Ägyptologen solche Ereignisse auf den Tag genau datieren können? Schließlich kannte man im Nilstaat weder unseren julianischen Kalender noch Christi Geburt als Bezugspunkt. Mehr noch: Wie im Alten Orient üblich, stellte jeder Thronwechsel die Jahreszählung auf eins zurück. Und wer wie lange regierte, überliefern nur wenige Quellen, zudem nie vollständig und verlässlich. So hatte beispielsweise Psammetich II. die Namen nubischer Pharaonen aus Königslisten tilgen lassen. Die Abfolge der Dynastien, die Regierungszeiten der jeweiligen Pharaonen, die in Geschichtsbüchern nachzuschlagen sind – sie alle beruhen auf dem Studium alter Schriften und detektivischer Kleinarbeit.

Schon Herodot (um 490 – um 425 v. Chr.), Begründer der Geschichtsschreibung, widmete in seinen »Historien« dem Land der Pharaonen ein Kapitel. Im zweiten Buch nennt er den ersten König des Landes »Min«, dies ent-

Der Wein der Pharaonen

Scherben von Weinkrügen lieferten Indizien für die Chronologie des Neuen Reichs. Denn den Vorratsgefäßen wurde das Erzeugungsjahr eingebrannt – mit Bezug zum regierenden Herrscher. So kamen im Regierungspalast von Malkatta, nahe Theben, Zeitangaben vom 24. bis 38. Amtsjahr des Amenophis III. zu Tage sowie solche aus dem 1. Jahr seines Sohnes und Nachfolgers Amenophis IV., heute besser bekannt als Echnaton. In dessen neuer Hauptstadt Achetaton fanden Archäologen ebenfalls Überreste von Weingefäßen. Deren Jahreszahlen stammten aus dem 4. bis 17. Regierungsjahr des Ketzerkönigs und dem 1. seines Nachfolgers Semenchkare. Das legt die Annahme nahe, Amenophis III. habe 38 Jahre regiert, sein Sohn sei bereits nach 17 Jahren abgelöst worden.

AKG BERLIN

Der erste Friedensvertrag

VLADIMIR KOROSTYSHEVSKIY / ISTOCKPHOTO

Es war ein Glanzpunkt in der Karriere Ramses II.: Im »1. Monat der Jahreszeit Peret, an dessen 21. Tag, im Jahr 21« der Regierungszeit des Pharaos Ramses schlossen Ägypten und das hethitische Reich einen Friedensvertrag. Der Pakt gilt als erster Friedensvertrag der Menschheitsgeschichte, und Ägyptologen fragten: Wie ist die Datumsangabe zu deuten?

Jürgen von Beckerath, heute Emeritus der Universität Münster, errechnete den 8. November 1259 v. Chr. Einen Anhaltspunkt für die Inthronisation des Herrschers lieferte ihm ein Festkalender Ramses III. im Tempel von Medinet Habu: »1. Monat der Überschwemmung, Herauskommen der Göttin Sothis an ihrem Tag.« Vermutlich handelt es sich bei dieser Inschrift nämlich um eine Kopie aus dem Totentempel Ramses' II. Daraus ließ sich für dessen Thronbesteigung ein Zeitraum von rund 250 Jahren ableiten: Zwischen 1314 und 1196 v. Chr. fiel der Frühaufgang des Sterns in den besagten Monat, die bekanntlich 66 Jahre dauernde Amtszeit Ramses' II. hätte im ersten dieser 118 Jahre enden beziehungsweise im letzten beginnen können.

Ein Neumonddatum aus dem 52. Regierungsjahr (II. Monat der Jahreszeit Peret, 27. Tag) schränkte die Auswahl ein. Der Mond wanderte mit einer Zykluszeit von 25 Jahren durch das ägyptische Jahr. Weil das Jahr der Inthronisation im Neuen Reich als Jahr 1 der Kalenderrechnung gezählt wurde, kamen laut Beckerath nur die Jahre 1253, 1228 und 1203 v. Chr. in Frage, für den Regierungsantritt Ramses' II. demnach 1304, 1279 oder 1254 v. Chr.

Mancher Briefwechsel des Pharaos mit Herrschern des Nahen Ostens sowie Schriftverkehr unter diesen Königen konnte nur vor, andere nach dem Friedensvertrag verfasst worden sein. Deshalb erschien 1279 v. Chr. als wahrscheinlichstes Jahr für den Amtsantritt. Der Pakt mit den Hethitern musste demnach 1259 v. Chr. geschlossen worden sein, nach heutiger Zeitrechnung am 8. November. Zwar ist diese Indizienkette nicht die einzig mögliche, das berechnete Datum wurde aber von vielen Ägyptologen inzwischen als richtig akzeptiert.

Klaus-Dieter Linsmeier

spricht möglicherweise dem legendären Menes –, dem Historiker wurde vermutlich tatsächlich eine Königsliste erläutert. Um eine Chronologie vorchristlicher Zeit im Sinn einer Heilsgeschichte bemühte sich Bischof Eusebios von Caesarea (260–340). Da Ägypten im Alten Testament eine große Rolle spielte, hatte er das überlieferte Wissen seiner Zeit zusammengetragen, allerdings mehr Mythen als Fakten, denn Hieroglyphen verstand man damals noch kaum zu lesen. Gut ein Jahrhundert später übersetzte Hieronymus (340–420) das Kompendium ins Lateinische. Beide Kirchenväter datierten Ereignisse übrigens noch nach der Skala der Olympiaden, erst im Jahr 525 legte der Mönch Dionysius Exiguus den Zeitpunkt der Geburt Jesu Christi auf das Jahr 754 *ab urbe condita* (der Gründung Roms) fest, von da an bildete das »Anno Domini« den wichtigsten Bezugspunkt christlicher Geschichtsschreibung.

Erst im 15. Jahrhundert, in der Renaissance, begann eine wirkliche Geschichtsforschung. Einen wichtigen Impuls dazu gaben bis dahin unbekannte Schriften griechischer Gelehrter – Flüchtlinge brachten sie aus Byzanz mit, das immer mehr unter den Druck des expandierenden Osmanischen Reichs geriet. Als Pionier der Chronologie-Forschung gilt Joseph Scaliger (1540–1609), ein in den Niederlanden lebender Hugenotte. Er schlug beispielsweise eine Jahreszählung vor, die alle Ereignisse der Menschheitsgeschichte seit der Schöpfung erfassen sollte; seinen Berechnungen gemäß bestimmte er das Jahr 4713 v. Chr. als ihren Nullpunkt. Scaliger billigte zudem Ägyptern, Babyloniern und Persern zu, in der Antike mehr als eine Statistenrolle neben Griechen und Römern gespielt zu haben.

Wenige Jahre nach dem Tod des großen Gelehrten entdeckte Bischof John Overall, Dekan der Londoner Saint Pauls' Cathedral, in einer griechischen Handschrift die Kopie einer Königsliste, die der große Alexandriner Astronom Ptolemaios (um 100–178) verwendet hatte. Für die nächsten 300 Jahre bildete dieser Jahrhundertfund die Basis aller Chronologie-Modelle.

Kleine Liste, große Wirkung

Der »Kanon des Ptolemaios« beginnt 747 v. Chr. mit dem Regierungsantritt eines babylonischen Königs namens Nabonassar. Ptolemaios' Aufstellung umfasst 43 Könige des 1. vorchristlichen Jahrtausends: 33 Herrscher Babylons, darunter Assyrer, Perser, Chaldäer und Griechen sowie zehn Angehörige der Ptolemäer, der in Alexandria regierenden griechischen Königsdynastie. Die Regentschaft des darauf folgenden Herrschers über Ägypten, Kaiser Augustus, beginnt im Kanon am 30. August 30 v. Chr., also mit der Annektierung des Nilstaats durch das Römische Reich. Vermutlich endete die – wohl nicht von Ptolemaios selbst, sondern einem früheren Alexandriner Gelehrten erstellte – Liste im 2. Jahrhundert n. Chr.; die ältesten heute bekannten Versionen reichen weiter, denn sie stammen aus dem 8. Jahrhundert.

Dafür, dass es eines der wichtigsten Dokumente der Antike ist, wirkt der Kanon auf den ersten Blick nicht sehr beeindruckend. Jede Zeile der Liste enthält drei Einträge: den Namen des Königs und zwei Zahlen. Der linke steht für die Dauer der Herrschaft, aufgerundet auf eine volle Anzahl so genannter ägyptischer Wandeljahre mit jeweils 365 Tagen, unterteilt in zwölf Monaten à dreißig Tagen plus fünf zusätzlichen Tagen ($12 \cdot 30 + 5 = 365$). Die rechte Zahl gibt die Summe aller solcher Jahre seit Beginn der Liste an.

Das ägyptische Jahr war auch in der frühen Neuzeit nichts Unbekanntes: Astronomen

[ACHTUNG! KLASSIK RADIO LÖST TRÄUME AUS]

Die besten Klassik Hits. Täglich 06:00 bis 18:00 Uhr.

- **Filmmusik** 18:00 bis 20:00 Uhr
- **New Classics** 20:00 bis 22:00 Uhr
- **Klassik Lounge** ab 22:00 Uhr
- **Entscheidernews** alle 30 Minuten

Deutschlandweit zu empfangen. Alle Frequenzen unter **www.klassikradio.de**

klassik radio

Bleiben Sie entspannt.

Fünf Könige

Der Tod eines Herrschers war stets ein Einschnitt in der Geschichte Ägyptens. Dennoch sind nur wenige Sterbedaten überliefert. Bei fünf Pharaonen gelang eine taggenaue Umrechnung in unseren Kalender. Ironie des Schicksals: Sie waren entweder keine gebürtigen Ägypter oder fremdländischer Abstammung.

Pharao	Ägyptisches oder babylonisches Datum	Julianisches Datum
Psammetich II. (libyscher Herkunft)	1. Monat der 1. Jahreszeit (Achet), 23. Tag, 7. Amtsjahr (ägyptisch)	9. Februar, 589 v. Chr.
Xerxes I. (Perserkönig)	5. Monat, 14. Tag, 21. Jahr (babylonisch)	4. August, 465 v. Chr.
Alexander der Große (Makedone)	2. Monat, 29. Tag, 14. Jahr (babylonisch)	11. Juni, 323 v. Chr. (zwischen 15.00 und 16.00 Uhr)
Philippos Arridaios (Makedone)	9. Monat, 27. Tag, 7. Jahr (babylonisch)	26. Dezember, 317 v. Chr.
Ptolemaios VIII. (makedonischer Herkunft)	6. Monat, 11. Tag, 54. Jahr (ägyptisch)	28. Juni, 116 v. Chr.

kannten es aus einem anderen Werk des Ptolemaios, dem »Almagest«, der bis zum 17. Jahrhundert als Standardwerk galt. Gerade weil dieses Jahr eine konstante Länge hat, sein Fehler von einem Vierteltag gegenüber dem realen Sonnenjahr nicht durch zusätzliche Schalttage korrigiert wurde, erwies es sich als ideal, um die Zahl der Tage zwischen astronomischen Ereignissen zu berechnen, die Hunderte von Jahren auseinanderlagen.

Diesem Zweck diente auch die nun entdeckte Königsliste des Gelehrten. Dass sie mit einem babylonischen Herrscher begann, hatte einen einfachen Grund: Vom 8. Jahrhundert v. Chr. an hatten Priester des Zweistromlandes Nacht für Nacht aufgezeichnet, was am Himmel geschah. Als Anfang des 3. Jahrhunderts v. Chr. die Universität in Alexandria gegründet wurde, begannen deren Gelehrte mit eigenen Beobachtungen, ergänzten sie aber um die Daten der Keilschrifttafeln, die sie ins Griechische übertrugen. Alle Zeitangaben waren jedoch zum einen auf die Regierungsjahre des amtierenden Herrschers bezogen, zum anderen auf einen Mondkalender, wie ihn die meisten frühen Hochkulturen nutzten. Zwölf Mondmonate entsprechen jedoch 354 bis 355 Tagen, weichen also deutlich vom Sonnenjahr ab, zudem schwankt ihre Länge zwischen 29 oder 30 Tagen, was den Einsatz von Schaltmonaten immer wieder erforderlich machte, die den Versatz gegenüber dem Sonnenjahr ausglichen.

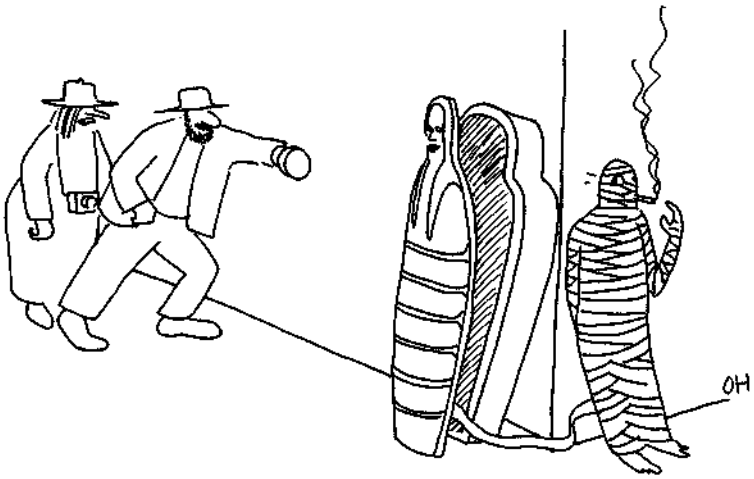
Der bereits im 3. Jahrtausend v. Chr. in Ägypten entwickelte Wandelkalender war im Gegensatz dazu durch seine konstante Länge für die Astronomen wesentlich besser geeignet. All die babylonischen Himmelsbeobachtungen aus 800 Jahren in dieses Raster umzurechnen, erwies sich als unproblematisch. Denn die Priester hatten in ihren »Tagebüchern« neben den Ereignissen auch die genaue Länge jedes einzelnen lunaren Monats notiert – ungefähr 10 000 an der Zahl. Die Königsliste ermöglichte dann, Angaben zu Regierungsjahren korrekt in das System der Wandeljahre zu übertragen.

Dass bei der Übertragung der babylonischen »Tagebücher« sauber gearbeitet wurde, legt ein Abgleich mittels moderner Astronomie nahe. Ein heute noch erhaltener Keilschrifttext verzeichnet eine totale Mondfinsternis für den »Tag 14, Monat 4 Jahr 7« der Herrschaft des persischen Königs Kambyses über Babylon. Ptolemaios notierte dies im »Almagest« als »Tag 17, Monat 7, Jahr 7« des Kambyses.

Perser auf dem Pharaonenthron

Modernen Berechnungen nach verdeckte die Erde ihren Trabanten von Babylon aus gesehen tatsächlich am 16. Juli 523 v. Chr. – ein Jahr vor dem Tod des persischen Königs Kambyses. Doch gibt der Kanon die politische Wirklichkeit Ägyptens korrekt wieder, seine Herrscher und Regierungszeiten? Eine erste Antwort lautet: Ja, und zwar zurück bis zum Jahr 525 v. Chr. Damals eroberten die Perser Ägypten und setzten der 26. Dynastie, zu der auch Psammetich II. gehörte, ein Ende – und damit jeder Hoffnung auf eine Rückkehr zu alter Größe. Von nun an regierten persische Herrscher als Pharaonen am Nil und als Könige im Zweistromland. Dementsprechend nennen babylonische und assyrische Keilschriften die im Kanon aufgelisteten Könige.

Papyri aus dem 5. Jahrhundert v. Chr., viele von der Nilinsel Elephantine, liefern wei-



tere Indizien. Verfasst wurden sie von dort stationierten Besatzungstruppen in Aramäisch, der Verkehrssprache des persischen Reichs. Das Datum notierten die Soldaten zum einen nach dem ihnen vertrauten babylonischen Mond-, zum anderen aber auch nach dem ägyptischen Wandelkalender. Anhand dieser Doppeldaten lässt sich unser Verständnis beider Systeme ein weiteres Mal überprüfen: Umrechnungen der Angaben in den julianischen Kalender, jeweils auf verschiedenen Wegen, kommen zum gleichen Ergebnis. Die Wahrscheinlichkeit, dass das auf reinem Zufall beruht, beträgt eins zu Billiarden.

Doch wer herrschte vor dem Jahr 525 v. Chr.? Penibel werten Ägyptologen alle Zeitangaben aus, die in Papyri oder auf den Wänden von Tempeln entdeckt werden. Dazu gehören auch Inschriften aus den Grabkammern der vor allem in Memphis verehrten und in der Nekropole von Sakkara beigesetzten Apisstiere. Die Texte nennen, bezogen auf den Wandelkalender, das Alter der Tiere sowie Geburts- und Todesdatum mit Bezug auf die amtierende Regierung. Besonders aufschlussreich sind Angaben bei Stieren, die offenbar zwei Pharaonen »erlebt« hatten. Aus solchen Informationen lassen sich Regierungszeiten bis 664 v. Chr. auf den Tag genau bestimmen. So auch das Sterbedatum Psammetichs II., laut den Quellen am 23. Tag des 1. Monats in seinem 7. Amtsjahr, in unserem Kalender, wie erwähnt, am 9. Februar 589 v. Chr. Wenn diese Ausgabe von »Spektrum der Wissenschaft« am 25. November 2008 in den Handel kommt, ist das Ereignis 948 466 Tage her.

Zwar reichen einige Apis-Inschriften bis 1200 v. Chr. zurück, doch vor dem 7. Jahrhundert ist die Abfolge der Stiere keineswegs lückenlos. Möglicherweise wurden manche andernorts bestattet, vielleicht war der Kult schlicht noch nicht so gut organisiert. Niemand vermag überdies abzuschätzen, wie viele Zeugnisse der Vergangenheit im Lauf der Jahrtausende zerstört wurden.

Weiter zurück führen die Sothis-Daten. »Sothis« ist die griechische Version des ägyptischen Namens für jenen hellen Fixstern, den wir als Sirius kennen. Auf der Bahn der Erde um die Sonne stand er etwa zwei Monate lang hinter unserem Zentralgestirn. Dann, an einem frühen Morgen im Juli (heutzutage August), erschien er zum ersten Mal wieder am Himmel. Diesem Aufgang folgte die für Ägypten so wichtige Zeit der Nilflut, die Felder bewässerte und fruchtbaren Schlamm brachte (das ägyptische Jahr wurde demgemäß in drei Jahreszeiten unterteilt: Überschwemmung – Achet, Aussaat – Peret, Ernte – Schemu). Beide Ereignisse brachte man in Zusammenhang. So galt die dem Stern zugehörige Göttin Sothis auch als Spenderin der Nilflut.

AKG BERLIN

Die »Galerie der Könige« aus dem Totentempel Sethos' I. (19. Dynastie) in Abydos verzeichnet die Namen der Pharaonen von Menes bis Sethos I. Wie vergleichbare Listen ist auch diese nicht vollständig. Verfemte Herrscher wie Echnaton werden beispielsweise nicht aufgeführt.

Bei Einführung des ägyptischen Wandelkalenders fiel sein Neujahrstag meiner Ansicht nach mit dem Tag des Sothis-Frühaufgangs zusammen. Der damals gebräuchliche Mondkalender hätte dies nahegelegt, denn er begann mit dem ersten Neumond, der auf den Sternaufgang folgte.

Schicksalsstern Sirius

Weil sich der ägyptische Kalender um etwas mehr als einen Vierteltag gegenüber dem Sonnenjahr verschiebt, fiel der Sothis-Aufgang meist vier Jahre lang auf den gleichen Tag, dann auf den nächsten und so fort, nach 1449,5 bis 1457,5 Sonnenjahren wieder auf das Ausgangsdatum (Eigenbewegungen des Sirius verlängern den sonst etwa 1423,5 Jahre langen Zyklus um 26 bis 34 Jahre).

Der römische Schriftgelehrte Censorinus verzeichnete im 3. Jahrhundert unserer Zeitrechnung, dass im Jahr 139 n. Chr. Sirius aufgegangen sei, und zwar am ägyptischen Neujahrstag. Mit diesem Wissen lassen sich die erhaltenen Sothis-Daten zunächst in den ägyptischen und dann weiter in den julianischen Kalender umrechnen. Allerdings stammen solche Datensätze aus der ohnehin gut bekannten griechisch-römischen Epoche. Nur zwei vollständige Angaben aus älterer Zeit sind uns bekannt, doch an ihnen lässt sich bereits die Chronologie des Mittleren (1. Hälfte des 2. Jahrtausends v. Chr.) und des Neuen Reichs (1500 – 1000 v. Chr.) verankern. Ein Papyrus aus Illahun in Nordägypten

PUBLIC DOMAIN

TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

Dem Astronomen Ptolemaios (um 100 – 178) und seinen Vorgängern diente die als »Kanon« bekannte Herrscherliste als Hilfsmittel, um Himmelsbeobachtungen mesopotamischer Priester in den ägyptischen Wandelkalender umzurechnen. Neben den Namen eines Königs sind dessen Regierungsjahre eingetragen, rechts daneben die Summe aus dieser Zahl und allen vorhergehenden (unteres Bild: neuassyrische Keilschrifttafel, 7. Jahrhundert v. Chr., Kopie einer wohl 1000 Jahre älteren Venusbeobachtung).

Der Kanon des Ptolemaios

Name des Königs	Reg.-Jahre	Summe Jahre
Nabonassar	14	14
Nadinu	2	16
Mukin-zeri und Pul	5	21
Ululayu	5	26
Merodach-baladan	12	38
Sargon II.	5	43
erste königlose Zeit	2	45
Bel-ibni	3	48
Aschur-nadin-schumi	6	54
Nergal-uschezib	1	55
Muschezib-Marduk	4	59
zweite königlose Zeit	8	67
Esarhaddon	13	80
Schamasch-schuma-ukin	20	100
Kandalanu	22	122
Nabopolassar	21	143
Nebuchadrezzar	43	186
Amel-Marduk	2	188
Neriglissar	4	192
Nabonid	17	209
Kyros	9	218
Kambyses	8	226
Darius I.	36	262
Xerxes I.	21	283
Artaxerxes I.	41	324
Darius II.	19	343
Artaxerxes II.	46	389
Artaxerxes III.	21	410
Arses	2	412
Darius III.	4	416
Alexander III., der Große	8	424
Philippos Arrhidaios	7	431
Alexander IV.	12	443
Ptolemaios I. Soter	20	463
Ptolemaios II. Philadelphos	38	501
Ptolemaios III. Euergetes	25	526
Ptolemaios IV. Philopator	17	543
Ptolemaios V. Epiphanes	24	567
Ptolemaios VI. Philometor	35	602
Ptolemaios VIII Euergetes II.	29	631
Ptolemaios IX. Soter II.	36	667
Ptolemaios XII. Neos Dionysos	29	696
Kleopatra VII. Philopator	22	718
Kaiser Augustus	43	761

verzeichnet einen Sothis-Frühaufgang am »8. Monat, 16. Tag, 7. Regierungsjahr«. Das Dokument wurde im Grabtempel von Sesostris II. gefunden und gehörte zu dessen Totenkult, war also in der Zeit des Nachfolgers Sesostris III. entstanden. Richtet man den ägyptischen Wandelkalender und den Sothis-Zyklus nach Censorinus' Angaben aus und verfolgt den Tag 16 im 8. Monat rückwärts durch die Zeit, kommt er im frühen 19. Jahrhundert v. Chr. dem Sternaufgang am nächsten. Als Anker für das Neue Reich dient das zweite komplette Sothis-Datum: 9. Tag, 11. Monat des Jahres 9 der Regierung des Amenhotep I. Es wird in einem Kalendarium auf der Rückseite des so genannten »Papyrus Ebers« aufgeführt, einem Werk über die Medizin Altägyptens. Nach allgemeiner Überzeugung der Experten fällt es auf eine Zeit kurz vor 1500 v. Chr. Das »Feintuning« der Chronologien beider Perioden erfolgt unter anderem anhand von Datumsangaben, die sich auf den Mondkalender beziehen.

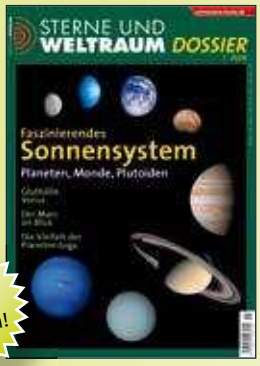
Ein Hoher Priester schreibt Geschichte

Wer in jenen Epochen den Nilstaat regierte, wissen wir aus verschiedenen Königslisten. So brachten Ausgrabungen im Jahr 1820 einen Papyrus zum Vorschein, auf dem Herrscher vom Ende des 3. bis zur Mitte des 2. Jahrtausends v. Chr. aufgelistet sind; er befindet sich heute im Antikenmuseum von Turin. Leider sollten nach dem Fund Jahre vergehen, bis Jean François Champollion (1790 – 1832) ihn zu Gesicht bekam, dem es als Erstem gelang, die Hieroglyphenschrift zu entziffern. Längst war der Papyrus da in Fragmente zerfallen, dennoch erkannte der Gelehrte, dass es sich um eine Liste von Pharaonen handelte. Gustav Seyffarth (1796 – 1885), Ägyptologe der Universität Leipzig, rekonstruierte den Text der verbliebenen Hälfte nach äußeren Merkmalen wie dem Faserverlauf des Papyrus. Verstanden hatte er ihn allerdings nicht, da er sich weigerte, Champollions Deutung der Hieroglyphen anzuerkennen.

Andere Aufzählungen entdeckten Forscher in ägyptischen Heiligtümern wie dem Tempel des Sethos I. in Abydos. Dort ziert eine Abfolge von 76 Namenskartuschen eine Wand. Und wie alle Listen der Pharaonen ist auch diese nicht vollständig, da politische Erwägungen bei ihrer Anfertigung eine Rolle spielten. So fehlt in Abydos unter anderem die Kartusche des geächteten Ketzerkönigs Echnaton.

Die erste Chronologie Ägyptens von den Anfängen bis in griechische Zeit erstellte ein ägyptischer Hoher Priester namens Manetho, möglicherweise im Auftrag seines Königs Pto-

NEUERSCHEINUNGEN



Im Handel erhältlich!

SUW-DOSSIER »FASZINIERENDES SONNENSYSTEM«

Unser Planetensystem wir ständig mit dutzenden Sonden beobachtet. Ihre zahlreichen Messdaten sind Basis unseres enormen Wissenszuwachses über die Welten im Sonnensystem. Das Dossier »Faszinierendes Sonnensystem« stellt die wichtigsten Beiträge der letzten drei Jahre zum Thema Planetenforschung aus der Zeitschrift **Sterne und Weltraum** neu überarbeitet und mit attraktiven Bildgalerien versehen zusammen. Aus dem Inhalt:

>> Die Sonne und ihre Trabanten
>> Phoenix auf eisiger Mission
>> Erdnahe Asteroiden – Eine Gefahr aus dem All?
>> Zwergplaneten und Plutoiden

€ 8,90

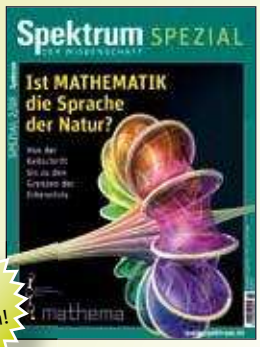
Im Handel erhältlich!

DOSSIER »GLÜCK, SCHAM, EIFERSUCHT«

Ist Eifersucht bei Männern und Frauen wirklich grundsätzlich verschieden? Welche Möglichkeiten gibt es, Stress zu zähmen? Lässt sich Glück quantifizieren? Wovon hängt unsere Hilfsbereitschaft gegenüber Fremden ab? Fakt ist: Kultur und Natur verschränken sich oft viel inniger, als wir uns bewusst machen. Unsere individuelle und soziale Existenz erfordert ein geglücktes Zusammenspiel von Rationalität und Gefühl. Das Dossier »Glück, Scham, Eifersucht« beleuchtet Aspekte solcher Wechselwirkungen. Aus dem Inhalt:

>> Was ist der Mensch?
>> Die Ursachen der Eifersucht
>> Vom Sinn der Homosexualität
>> Hilfsbereitschaft unter Fremden

€ 8,90



Im Handel erhältlich!

SPEZIAL »IST MATHEMATIK DIE SPRACHE DER NATUR?«

Das Heft steht im engen Zusammenhang mit der Ausstellung »mathema – Ist Mathematik die Sprache der Natur?« , die derzeit im Deutschen Technikmuseum Berlin zu sehen ist. Die Themenauswahl knüpft an die Lebenswirklichkeit des Besuchers und des Lesers an und regt zur Entdeckung der Mathematik in der alltäglichen Welt an. Unter anderem werden Fragen behandelt wie: Welchen Beitrag liefert die Zahlentheorie zur Verschlüsselung von Nachrichten? Inwieweit steckt in der uns umgebenden Welt Mathematik? Gibt es eine unüberwindliche Grenze mathematischer Erkenntnis? Aus dem Inhalt:

>> Womit rechnen wir?
>> Aus welchen Formen besteht die Welt?
>> Der Dämon und der Schmetterlingseffekt
>> Mathemathik + Kinder = Spaß

€ 8,90

Im Handel erhältlich!

GEHIRN&GEIST-SERIE:

SCHULZEIT – DAS MACHT KINDER STARK

»Das macht Kinder stark« ist der dritte Teil der **Gehirn&Geist**-Serie »Kindesentwicklung«. Das Heft enthält Beiträge, in denen die wichtigsten psychologischen Erkenntnisse für das Alter zwischen dem 6. und dem 12. Lebensjahr vorgestellt werden. Themen sind u. a.: Woran erkennt man Hochbegabung? Was dürfen Kinder im Fernsehen anschauen? Glück lernen – ein Unterrichtsfach fürs Wohlbefinden. Aus dem Inhalt:

>> Wenn die Schulbank drückt
>> Ein seelisches Polster aufbauen
>> Hochbegabung, Fakten und Fiktionen
>> Kinder sind keine Taschenrechner

€ 8,90

>> Alle Hefte sind im Handel erhältlich.
Bestellen können Sie mit dem Beihefter oder unter www.spektrum.com/sonderhefte

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751
service@spektrum.com

Die Chronologie Ägyptens im Zeitraffer

Epoche/Dynastie	Datierung (v. Chr.)	Genauigkeit
Griechische Zeit		
Alexander der Große und die Ptolemäer	332 – 30	taggenau
Spätzeit		
Dynastien 26 bis 31	664 – 332	taggenau, nur 400 – 359: Fehler ein bis zwei Jahre
Dynastie 25 (nubische Pharaonen)	ca. 730 – 664	möglicherweise taggenau ab 690 (Pharao Taharka)
Dritte Zwischenzeit		
Dynastien 21 bis 24	ca. 1050 – ca. 730	Eine Kette von Regierungen unsicherer Länge überbrückt die Distanz zum Neuen Reich.
Neues Reich		
Dynastien 18 bis 20	ca. 1550 – ca. 1050	Das Sothis-Datum des »Papyrus Ebers« und Daten aus Amarna dienen als Anker einer langen Abfolge von Regierungen unsicherer Länge, Fehlerbreite ungefähr 20 Jahre; Monddaten verfeinern die Datierungen.
dazu gehören die Herrscher:		
Ramses II. (19. Dynastie)	regierte wenigstens 66 Jahre, um und definitiv nach 1300	
Echnaton (18. Dynastie)	regierte etwa 17 Jahre, in der 1. Hälfte des 14. Jahrhunderts	
Amenhotep III. (18. Dynastie)	regierte wenigstens 36 Jahre um 1400	
Hatschepsut (18. Dynastie)	regierte wenigstens 19 Jahre, stellvertretend für Tuthmosis III.	
Tuthmosis III. (18. Dynastie)	regierte wenigstens 52 Jahre, wahrscheinlich vor allem in der 1. Hälfte des 15. Jahrhunderts	
Zweite Zwischenzeit		
Dynastien 13 bis 17	ca. 1800 – ca. 1550	Abfolge von Regierungen unsicherer Länge
darunter Dynastie 15 (Hyksos)	(grob)	
Mittleres Reich		
Dynastien 11 und 12	ca. 2000 – ca. 1800	Das Sothis-Datum des »Illahun-Papyrus« dient als Anker einer langen Kette von Regierungen unsicherer Länge, Fehlerbreite etwa 50 Jahre; Monddaten verfeinern Datierungen.
dazu gehört der Herrscher:		
Sesostris III.	regierte 19 Jahre um 1880	
Erste Zwischenzeit		
Dynastien 9 und 10	ca. 2150 – ca. 2000	nur grob gefasste Epoche, die dem Mittleren Reich vorangeht
Altes Reich		
Dynastien 3 – 8	ca. 2600 – ca. 2150	als Epoche abgegrenzt, die dem eindeutiger datierbaren Mittleren Reich vorangeht, abgesichert durch C-14-Daten sowie eine Datumsangabe zum so genannten Wag-Fest, gefunden im Totentempel des Pharaos Neferefre in Abusir, Fehlerbreite etwa 100 Jahre
dazu gehören die Herrscher:		
Unas (5. Dynastie)	regierte etwa 20 Jahre zwischen 2350 und 2300	
Cheops (4. Dynastie)	regierte etwa 25 Jahre um 2500	
Djoser (3. Dynastie)	regierte etwa 25 Jahre im frühen 26. Jahrhundert	
Frühdynastische Zeit		
Dynastien 1 und 2	ca. 3100 – ca. 2600	nur sehr grob datierbare Epoche

lemaios II. (285–246 v. Chr.), einem engagierten Förderer von Wissenschaft und Kunst. Manetho unterteilte erstmals die ägyptische Geschichte in 30 Königshäuser. Doch seine »Aegyptiaca« kennen wir nur aus Zitaten späterer Historiker wie Flavius Josephus oder dem erwähnten Eusebios. Verlässlich war das Werk sicher nur bedingt, denn Manetho dürfte es anhand von Dokumenten aus Tempelarchiven erstellt haben, und die waren von der Politik sicher nicht unbeeinflusst. Hinzu kommt, dass Manetho Originalnamen ins Griechische übertrug und dabei regelrecht verstümmelte: Manch ein Pharao taucht nach heutiger Kenntnis mehrfach auf, der Bezug zu babylonischen oder assyrischen Texten ist nicht immer eindeutig.

Sothis-Daten – wo wurde der Aufgang beobachtet?

Aus all diesen Quellen, ägyptischen wie babylonischen oder assyrischen, anhand von Datumsangaben, Informationen zu Sothis-Frühaufgängen und anderen Himmelsereignissen rekonstruieren Ägyptologen die Phasen ägyptischer Geschichte. Wer die Literatur aufmerksam studiert, bemerkt rasch, dass sie zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen können, 10 bis 20 Jahre Schwankungsbreite für das Neue, 40 bis 50 Jahre für das Mittlere Reich sind nicht ungewöhnlich.

Ein Grund sind beispielsweise Unsicherheiten über den genauen Zeitpunkt des Sothis-Aufgangs. Weil das ägyptische Jahr gegenüber dem natürlichen Sonnenjahr um etwa einen Vierteltag zu kurz ist, wurde er in vier Jahren am gleichen Kalendertag beobachtet. Zudem: Wo genau erfolgte die Sichtung des Sirius? Zwischen Memphis, der alten Hauptstadt im Nildelta, und Elephantine an Ägyptens Grenze zu Nubien lagen sechs Breitengrade, und das entsprach einem Unterschied von sechs Tagen Beobachtungszeit. Galt schon das erste Aufleuchten oder wartete man, bis Sothis hell erstrahlte, also schon höher am Himmel stand? Wurde der Stern überhaupt wirklich gesichtet oder sein Aufgang lediglich errechnet? Unklarheiten über die genaue Dauer mancher Regierungszeit kommen hinzu.

Die Chronologie Ägyptens bleibt also ein spannendes Forschungsfeld. Nicht zuletzt wäre es meines Erachtens wünschenswert, die Fülle an Ergebnissen aus mehreren Jahrzehnten auf dem heutigen Kenntnisstand neu zu bewerten und systematisch aufzuarbeiten; so ließen sich vermutlich noch lückenhafte Indizienketten schließen. Alles in allem aber hat das hier vorgestellte Gerüst bereits viele Bewährungsproben bestanden. Freilich: Ein Modell ist ein Modell, ändert sich der Erkenntnisstand, muss man es korrigieren. Beispielsweise datierten Historiker die Pyramiden von Giseh bis in die 1930er und 1940er Jahre noch ins 4. Jahrtausend v. Chr. oder sogar noch früher. Heute wissen wir, dass die größte der drei Pyramiden unter Pharao Cheops erst im 26. Jahrhundert v. Chr. entstand. Derart dramatische Änderungen aber scheinen heute kaum noch wahrscheinlich. Das gilt auch für das so genannte alternative Modell des britischen Historikers Peter James (siehe den folgenden Beitrag), der 400 bis 500 Jahre vom Ende der 19. bis zum Beginn der 25. Dynastie halbieren möchte. Ramses II. beispielsweise hätte dann etwa 200 Jahre später regiert.

Ein Kernpunkt seiner Kritik ist die Grundannahme, der Wandelkalender sei niemals reformiert, seine offensichtliche Abweichung von den natürlichen Jahreszeiten also nie korrigiert worden. Doch dafür spricht nicht nur die Datierung von Funden jener Zeit mittels der C-14-Methode, also einem rein physikalischen Verfahren. Für Ägyptologen noch bedeutsamer sind »Synchronismen«, das sind voneinander unabhängige »Gleichzeitigkeiten«. Insbesondere tauchen in der umfangreichen Korrespondenz assyrischer Herrscher mit der von Echnaton gegründeten Residenz in Amarna Namen auf, die sich in einer in Assyrien aufgestellten Herrscher-Chronologie vom 16. bis zum 7. Jahrhundert v. Chr. ebenfalls finden. Beispielsweise stammt der Amarnabrief 16 von einem gewissen Assuruballit, der von 1360 bis 1330 v. Chr. regierte – genau die Zeit, die nach der vorgestellten Standardmethode für Echnaton errechnet wurde. Nach drei voneinander unabhängigen Kriterien – Sothis- und C-14-Datierung sowie verschiedenen Synchronismen – lebte Echnaton also im 14. Jahrhundert v. Chr. Kann ein solches Ergebnis Zufall sein?

Wer dennoch kaum glauben mag, dass es im Pharaonenreich während mehr als 3000 Jahren niemals eine Kalenderreform gab, unterschätzt den hohen Stellenwert, der dort Traditionen zukam. Zudem: Welchen Sinn hätte eine Reform für die Menschen gehabt? Vermutlich waren 99 Prozent der Ägypter einfache Bauern, in deren Lebensspanne sich der Wandelkalender gegenüber dem Sonnenjahr um kaum mehr als zehn Tage verschoben haben dürfte. Er blieb also innerhalb einer Toleranz, wie sie natürliche Zyklen der Nilhochwasser, der Saat und Ernte ebenfalls aufwiesen. Und wir wissen: Selbst ein Pharao konnte am heiligen Wandeljahr nicht rütteln. Als Ptolemaios III. im Jahr 238 v. Chr. anordnete, zur Korrektur alle vier Jahre einen Schalttag hinzuzufügen, wurde dies von Volk und Priesterschaft schlicht ignoriert. ◁

CORBIS, ROGER WOOD

Als Manifestation des Schöpfergottes Ptah verehrt, wurden die heiligen Apis-Stiere in der Nekropole Sakkara beigesetzt. Angaben zur Lebenszeit der Tiere ermöglichen, die Regierungszeiten der jeweils amtierenden Herrscher zurück bis 664 v. Chr. auf den Tag genau zu berechnen.

Leo Depuydt lehrt Ägyptologie an der Brown University in Providence (US-Bundesstaat Rhode Island).

Beckerath, J. von: Chronologie des Pharaonischen Ägypten. Die Zeitbestimmung der ägyptischen Geschichte von der Vorzeit bis 332 v. Chr. Münchner Ägyptologische Studien, Bd. 46. Philipp von Zabern, Mainz 1997.

Depuydt, L.: Civil Calendar and Lunar Calendar in Ancient Egypt. Peeters Publishers, Leuven 1997.

Hornung, E. et al. (Hg.): Ancient Egyptian Chronology. Handbook of Oriental Studies. Brill Academic Publishers, Leiden 2006.

Steele, J. (Hg.): Calendars and Years: Astronomy and Time in the Ancient Near East. Oxbow Books Limited, Oxford 2007.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

GESCHICHTSBILD *in Scherben?*

Wann regierte König Salomon – oder ist er nur ein Mythos? Eine Korrektur der Standarddatierung Palästinas um 100 oder gar 200 Jahre könnte Archäologen die Suche nach Belegen erleichtern, hätte aber auch Folgen für die ägyptische Geschichtsschreibung.

Von Peter James und Peter van der Veen

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Keine 500 Kilometer lang und mitunter nur 15 Kilometer breit, arm an Rohstoffen und überdies zur Hälfte von Wüste bedeckt – man sollte kaum glauben, dass Palästina seit der Antike heiß umkämpft ist. Doch seine fruchtbaren Täler und Hochebenen, vor allem aber seine strategisch günstige Lage weckten stets Begehrlichkeiten: Wer über die Levanteküste herrschte, kontrollierte Land- und Seewege zwischen Ägypten, Mesopotamien und den Reichen Kleinasiens. Dementsprechend ist die Geschichte des Heiligen Landes eng mit der seiner Nachbarn verknüpft.

Wer sie erkundet, steht rasch im Licht der Öffentlichkeit: Ob eine Grabung Berichte des Alten Testaments bestätigt oder widerlegt, liefert heutzutage nicht nur Argumente für oder gegen die Bibel, sondern sogar für oder gegen das Existenzrecht des modernen Staates Israel. Umso wichtiger ist eine wissenschaftlich geführte und offene Diskussion in der Bibelarchäologie. Dem naiven Optimismus des 1955 publizierten Sachbuchs »Und die Bibel hat doch Recht« wird sich heute niemand mehr anschließen, und die Kritik des Archäologen Israel Finkelstein von der Tel Aviv University findet immer mehr Zuhörer: Grundlegende Bausteine biblischer Geschichte passen seines Erachtens nicht zum archäologischen Befund. Oder 2002 von ihm zugespitzt formuliert: Es gab »keine Posaunen vor Jericho«.

Damit spielte er auf die in der Bibel überlieferte kriegerische »Landnahme« in Kanaan an, einen der Gründungsmythen Israels. Als Pharao der Heiligen Schrift gilt Ramses II., der laut heute gängiger Chronologie Ägyptens ab 1279 v. Chr. regierte. Demnach hätte das Volk Gottes Jericho im Lauf des 13. Jahrhunderts erobert. Damals jedoch existierte Jericho als Stadt nicht mehr. C-14-Datierungen zufolge wurden entsprechende Befestigungen um 1550 v. Chr. zerstört. Da hilft es auch nicht viel, dass einige Archäologen die Landnahme schon früher, nämlich im 15. Jahrhundert v. Chr. ansiedeln.

Ein Widerspruch zwischen Überlieferung und archäologischem Befund ergibt sich auch für die Zeit der ersten Könige Saul, David und Salomon. Bedroht durch das an der Küste siedelnde Volk der Philister und unter dem Druck einer wachsenden Bevölkerung, so die Bibelforscher, entwickelte sich das Königtum als neue Herrschafts- und Gesellschaftsform. Nach wie vor dem einen Gott verpflichtet – im Unterschied zu anderen Herrschern des Alten Orients, denen selbst ein göttlicher Status zukam – hielten Israels Monarchen alle weltliche Macht in ihrer Hand. Da die biblischen Berichte Potentaten benachbarter Länder nennen, zudem markante Ereignisse wie Schlachten, Hungersnöte und Erdbeben, die in den Chronologien jener Kulturen ebenfalls erwähnt werden, ließ sich durch Vergleich der Textquellen eine Abfolge der Könige im Heiligen Land erstellen. Demnach bestieg Saul um 1025 v. Chr. als Erster den Thron, 20 Jahre später folgte David, 970 v. Chr. Salomon.

Ein solcher Einschnitt in der Geschichte einer Kultur sollte sich im archäologischen Befund widerspiegeln. Aber Davids Unterwerfung aller Stämme wie auch die Eroberung Jerusalems haben anscheinend kaum eindeutige Spuren hinterlassen, ebenso wenig die im Alten Testament erwähnten Bauprojekte Salomons, etwa sein monumentaler Tempel oder der Millo, eine Wehranlage. Was immer Mitte des 20. Jahrhunderts ausgegraben wurde und

Das Heilige Land (hier die im Artikel genannten Orte und Ausgrabungsstätten) gehörte im 13. und 12. Jahrhundert v. Chr. zu Ägypten.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

BEIDE FOTOS MIT FRDL. GEN. VON DAVID USSISHKIN, UNIVERSITÄT TEL AVIV

Seit Anfang der 1990er Jahre graben Archäologen auf dem Tell Jesreel (siehe Karte links) die Ruinen eines Palastes aus. Den Keramikfunden nach wurde er in der Zeit des Königs Salomon erbaut, der historische Kontext aber spricht dafür, ihn mehr als ein Jahrhundert später anzusetzen.

das Urteil »Und die Bibel hat doch Recht« begründete, erwies sich inzwischen auf Grund verbesserter Ausgrabungs- und Datierungsmethoden als zweifelhaft. Manche der Bauwerke sollen älter sein, andere jünger.

Hat die Bibel also Unrecht? Entbehren die Gründungsmythen Israels jeglicher Wahrheit? Wir glauben: nein. Finkelsteins Kritik lehrt uns, dass die Chronologien des Heiligen Landes und die der damit vernetzten Kulturen des Alten Orients überdacht und archäologische Funde neu zugeordnet werden sollten. Die These unseres Teams aus Bibelarchäologen, Ägyptologen und Assyriologen lautet: Die

Palästinas Geschichte – neu datiert

Archäologische Perioden	Standard-chronologie Palästinas	Chronologie nach Finkelstein	Chronologie nach James und van der Veen	historische Charakteristika
Mittlere Bronzezeit IIA	2000 – 1750	2000 – 1750	1800 – 1550	**Palästina:** Anfang einer neuen Stadtkultur **Ägypten:** Mittleres Reich, 12. Dynastie **Mesopotamien:** Isin-Larsa-Periode und 1. Dynastie von Babylon
Mittlere Bronzezeit IIB	1750 – 1550	1750 – 1550	1550 – 1350	**Palästina:** Kanaanäische Stadtstaaten **Ägypten:** 13. – 15. Dynastie, Hyksoszeit **Mesopotamien:** 1. Dynastie von Babylon
Späte Bronzezeit I	1550 – 1400	1550 – 1400	1350 – 1200	**Palästina:** Stadtstaaten unter ägyptischer Herrschaft **Ägypten:** Neues Reich, 18. Dynastie (bis Amenhotep II.) **Mesopotamien:** Kassiter in Babylon
Späte Bronzezeit IIA	1400 – 1300	1400 – 1300	1200 – 1100	**Palästina:** Aufstände der Haribu während der Amarnazeit **Ägypten:** Neues Reich, 18. Dynastie (bis Horemheb) **Mesopotamien:** mittelassyrisches Reich
Späte Bronzezeit IIB	1300 – 1200	1300 – 1150	1100 – 950	**Palästina:** Stadtstaaten erneut unter ägyptischer Herrschaft **Ägypten:** Neues Reich, 19. – 20. Dynastie (Ramessiden) **Mesopotamien:** mittelassyrisches Reich
Eisenzeit IA	1200 – 1100	1150 – 1050	1000 – ca. 900	**Palästina:** Zerfall der alten Stadtstrukturen, Besiedlung des zentralen Hügellandes (Landnahme?) **Ägypten:** Seevölkerkriege, innere Unruhen **Mesopotamien:** mittelassyrisches Reich
Eisenzeit IB	1100 – 1000	1050 – 930	ca. 900 – 870	**Palästina:** Siedlungswachstum, regionale Zentren entstehen **Ägypten:** Königshäuser in Tanis und Theben **Mesopotamien:** dunkles Zeitalter
Eisenzeit IIA	1000 – 900	930 – 800	870 – 750	**Palästina:** Bautätigkeit in Jerusalem, Megiddo, Hazor, konventionell Zeit der Könige David und Salomon **Ägypten:** mehrere Königshäuser **Mesopotamien:** dunkles Zeitalter
Eisenzeit IIB	900 – 700	800 – 720/700	750 – 650	**Palästina:** Nationalstaaten Israel und Juda **Ägypten:** mehrere Königshäuser **Mesopotamien:** neuassyrisches Reich
Eisenzeit IIC	700 – 586	720/700 – 586	650 – 586	**Palästina:** Untergang des Nordreichs Israel, Tributzahlungen an Assyrien **Ägypten:** mehrere Königshäuser **Mesopotamien:** neuassyrisches und neubabylonisches Reich
Eisenzeit III	586 – 530	586 – 450	586 – 450/400	**Palästina:** Exil in Babylon und Rückkehr **Ägypten:** Könige von Sais, persischer Einfluss **Mesopotamien:** Babylonier, Perser
Perserzeit	530 – 333	450 – 333	450/400 – 333	**Palästina:** persische Provinz Jehud **Ägypten:** persische Provinz **Mesopotamien:** Perser

Eisenzeit in Palästina – die nach bisherigem Verständnis mit der Landnahme begann und mit der babylonischen Eroberung endete – war 100 bis 200 Jahre kürzer und begann nicht zwischen 1200 und 1150 v. Chr., sondern erst um 1000 v. Chr., in der Zeit Davids und Salomons. Ein zeitlicher Versatz, der sich bis in die Bronzezeit zurück fortsetzt (Tabelle links).

Epochenbegriffe wie Bronzezeit und Eisenzeit stammen aus den früheren Jahren der Archäologie und bezogen sich unmittelbar auf die mutmaßlichen materiellen Hinterlassenschaften der Altvorderen. Um Funde zeitlich einzuordnen, erkunden und dokumentieren Altertumsforscher zunächst die Stratigrafie, also die geordnete Abfolge von Siedlungsschichten: Ohne Störung etwa durch Erdbeben oder Raubgräber müssen diese zwangsläufig umso älter sein, je tiefer der Archäologe vordringt. Diese relative Datierung wird anhand von Fundstücken präzisiert und in den Kontext einer Chronologie gestellt. Holzkohle und Knochen lassen sich mit der C-14-Methode datieren, doch organische Reste findet man nicht immer, zudem gelten solche physikalischen Methoden für die Zeit vor dem 9. Jahrhundert v. Chr. als noch zu ungenau. Den Hauptteil der Informationen liefern deshalb Scherben und Schriftfunde. Wie ein Urzeitforscher Erdschichten nach Leitfossilien verortet, so gehören Keramikstile zu den klassischen Datierungshilfen in der Archäologie.

Wer erbaute Samaria?

Für das frühe 1. Jahrtausend v. Chr. sind aber vor allem Inschriften von Bedeutung, die eine direkte oder indirekte Verbindung mit dem Zweistromland ermöglichen. Denn die assyrische und babylonische Königschronologie wurde bis zurück in das Jahr 911 v. Chr. lückenlos rekonstruiert. Weil Keilschriftdokumente der Monarchen ab Mitte des 9. Jahrhunderts v. Chr. Könige Israels auflisten, lassen sich, wie schon erwähnt, in der Bibel genannte Potentaten datieren. Findet man nun bei einer Grabung Siegel mit Namen von Beamten bekannter biblischer Könige, Bau- und Kriegsinschriften, lässt sich das Alter der zugehörigen archäologischen Schichten erschließen; Gleiches gilt für Zerstörungsschichten, die mit Feldzügen der Mesopotamier in Verbindung gebracht werden können.

Das klingt einfacher, als es ist, denn nur wenige solcher Texte wurden in ihrem ursprünglichen Gebrauchskontext entdeckt. Siegel wurden irgendwann nicht mehr verwendet und achtlos auf Müllhalden oder in Zisternen geworfen, in Stein gehauene Inschriften zerbrachen beim Abriss einer Mauer, wurden vielleicht später andernorts als Baumaterial recycelt. Ohnehin stammt manch interessantes Objekt der Bibelarchäologie nicht aus einer gut dokumentierten Grabung, sondern aus einer Privatsammlung oder einer Museumsvitrine. Ohne den Fundkontext aber lässt sich das Alter nur schwer bestimmen, und manche Kostbarkeit wurde schon als gut gemachte Fälschung entlarvt.

So muss es nicht verwundern, dass die Chronologie der archäologischen Schichten Israels keineswegs in sich schlüssig ist. Archäologen entdeckten bereits in den 1930er Jahren eine Unstimmigkeit. In der Palastanlage des antiken Samaria brachten sie reichlich Keramik ans Licht, von dem ein kleinerer Teil dem Stil nach in das 11. Jahrhundert v. Chr. gehört (Eisenzeit IB), das Gros jedoch ins 10. Jahrhundert v. Chr. (Eisenzeit IIA). Letzteres wird der Zeit Salomons zugeschrieben, demnach wäre er oder einer seiner Zeitgenossen Bauherr der Residenz gewesen. Doch dem widerspricht die biblische Überlieferung: Erst lange nach Salomons Tod und dem darauf folgenden Zerfall seines Reichs in die Staaten Juda und Israel ließ Omri, ein König Israels, Samaria auf dem Gelände eines Weinguts als seine Residenz errichten. Omri war eine historische Person des 9. Jahrhunderts, das lässt sich aus assyrischen Annalen schließen. Dieser Widerspruch wurde lange unter den Tisch gekehrt, erst Finkelsteins Team brachte ihn wieder in die wissenschaftliche Diskussion ein.

Auch Omris Sohn Ahab hat ohne Zweifel wirklich gelebt: 853 v. Chr. stand er den Assyrern laut deren Chroniken auf dem Schlachtfeld gegenüber. Ahabs Palast glauben Archäologen auf dem Tell Jesreel, einem östlich von Haifa gelegenen Ruinenhügel, gefunden zu haben; Anfang der 1990er Jahre wurde dort gegraben. Anhand verschiedener Informationen

ZEV RADOVAN, WWW.BIBLELANDPICTURES.COM

»Gehört dem Minister des Königs Jerobeam«, ist auf diesem Siegel zu lesen, das 1904 im Torbogen eines Palastes in Megiddo zum Vorschein kam. Weil die zugehörige Siedlungsschicht als »salomonisch« galt, identifizierten Bibelforscher diesen König als Salomons Nachfolger (regierte ab 930 v. Chr.). Der Darstellungs- wie der Schreibstil entsprechen aus heutiger Sicht aber eher dem 8. Jahrhundert v. Chr. – gemeint wäre dann jener Jerobeam, der um 790 v. Chr. den Thron bestieg.

Archäologen erkannten schon in den 1930er Jahren eine Unstimmigkeit der Standardchronologie. Doch sie wurde nicht beachtet

zur Geschichte gingen die Forscher von einem Baubeginn etwa um 860 v. Chr. aus. Doch wieder passen die Keramikfunde nicht dazu, denn sie würden anhand von Stilmerkmalen ebenfalls der Eisenzeit IIA zugeschrieben. Wenn der Palast also wirklich erst unter Ahab gebaut wurde – wie es die Ausgräber vermuten, weil die Residenzstädte früherer Zeit andernorts lagen –, entstanden dann auch andere Salomon beziehungsweise seinen Zeitgenossen zugeschriebene Anlagen erst unter Ahab?

Diese These vertreten die Forscher um Finkelstein, sie glauben an einen Beginn der Eisenzeit IIA um 930 v. Chr. Dass sich die Mehrheit der Bibelarchäologen damit schwertut, lässt sich leicht verstehen: Die entsprechenden Ruinen müssten zunächst aus der Inventarliste Salomons gestrichen werden, seine in der Bibel berichtete Bautätigkeit fiele offenbar noch bescheidener aus als bislang gedacht.

Doch mit einer Neudatierung der Anlagen muss zwangsläufig auch eine solche der Keramik einhergehen. Mit anderen Worten: Keramik der Eisenzeit IIA stammt aus einer deutlich jüngeren Zeit. Mehr noch: In den frühesten Schichten Samarias kam wie erwähnt auch IB-Keramik zu Tage, die herkömmlich auf 1100 bis 1000 v. Chr. datiert und eigentlich als Periode begriffen wird, die vor der Königszeit lag. Wenn eine solche aber in einem Palast Omris gefunden wird, einem Herrscher des 9. Jahrhunderts v. Chr., muss die Keramik der auf IB folgenden Eisenzeit IIA noch deutlich jünger sein. Wir gehen von einem Beginn dieser Periode um 870 v. Chr. aus (siehe Tabelle S. 90).

Denkt man diese Gedanken weiter, steht zweifelsohne selbst der Beginn der Eisenzeit in Palästina überhaupt, die Phase IA, zur Disposition. Neue Ausgrabungen in Jerusalem liefern auch dafür Indizien. Seit 2005 legt die israelische Archäologin Eilat Mazar auf dem südlich vom Tempelberg gelegenen Hügel Überreste eines Verwaltungsgebäudes frei, das nach ihrer Ansicht aus der Zeit Davids stammt, vielleicht sogar sein Palast war. Doch die Keramik aus der frühesten Phase des Gebäudes gehört zur Eisenzeit IA, würde also traditionell auf das 12. Jahrhundert v. Chr. und die Zeit der Landnahme datiert werden. Aus der gleichen Periode stammt offenbar auch eine stufenförmige Wehranlage am Osthang des Hügels, das zeigt die dort 2007 ausgegrabene Keramik. Mit anderen Worten: Zwar passen beide Anlagen gut zu biblischen Berichten – Salomon soll dort eine Wehranlage gebaut haben, den Millo –, doch nach der konventionellen Chronologie wären sie gut 200 Jahre zu alt.

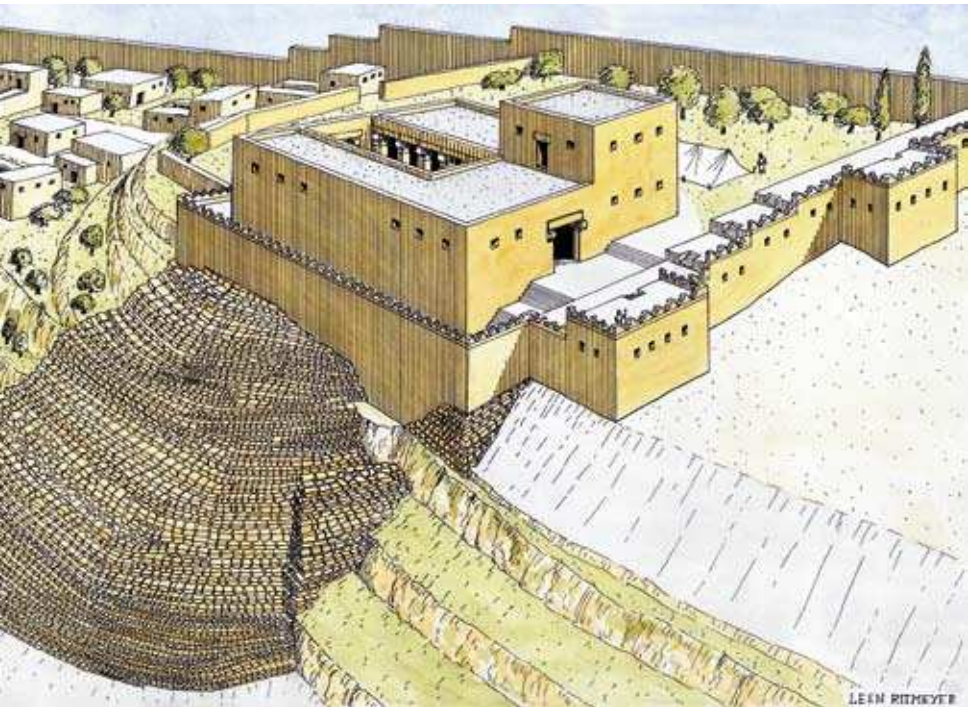
Hat die Bibel doch Recht?

Wir sind inzwischen davon überzeugt, dass die Eisenzeit IA erst um 1000 v. Chr. begann und der Zeit Davids zuzurechnen ist, dass zur Zeit Salomons und weiterer Könige Jerusalems zunächst ebenfalls noch die Keramik der Eisenzeit IA in Verwendung war und zu einem noch unbekannten Zeitpunkt dann der IB-Stil aufkam. Diese neue Sichtweise löst zahlreiche Probleme der Archäologie Palästinas. Die Zerstörung Jerichos hätte dann etwa 1400 v. Chr. stattgefunden, was noch innerhalb der Toleranzgrenzen der C-14-Methode liegt und gut zur »Landnahme« im 15. Jahrhundert passt. Es gäbe in Jerusalem endlich jene imposanten Bauwerke, die laut biblischem Bericht im goldenen Zeitalter Salomons errichtet wurden. Andernorts könnte man auf entsprechende Anlagen stoßen, man muss nur in tieferen Siedlungsschichten danach suchen.

Warum aber haben sich Bibelarchäologen bislang so geirrt? Die Antwort wiegt schwer. Der Beginn der Eisenzeit in Palästina ist fest mit der Chronologie Ägyptens verbunden, denn das Gebiet gehörte bis auf kurze Perioden zum Herrschaftsbereich der Pharaonen des 13. und 12. Jahrhunderts v. Chr. Dementsprechend verzeichnen Inschriften aus Schichten der späten Bronzezeit und der frühen Eisenzeit die Namen ägyptischer Herrscher. Muss auch Ägyptens Geschichte für das 2. Jahrtausend v. Chr. revidiert werden?

Auch wenn es noch eine Außenseitermeinung ist, findet sie doch zunehmend Beachtung. Die Datierung des Mittleren und des Neuen Reichs Ägyptens basiert vor allem auf

Südlich des Tempelbergs graben Archäologen ein palastartiges Gebäude mit einer vorgelagerten, massigen Wehranlage aus. Sind die Ruinen die des biblischen »Davidspalastes« beziehungsweise Salomons »Millo«?



LEEN RITMEYER

Briefwechseln von Pharaonen der Amarnazeit mit assyrischen und babylonischen Herrschern – ein erwähnter Herrscher Assuruballit sei mit dem in der assyrischen Königsliste aufgeführten Assuruballit I. (14. Jahrhundert v. Chr.) identisch –, aber auch auf zwei Angaben zum Aufgang des Sterns Sothis (siehe den vorigen Beitrag). Doch es gibt vereinzelt Kritik. So verwies Pierce Furlong von der University of Melbourne vor Kurzem in seiner Doktorarbeit darauf, dass Namen und Reihenfolge einiger babylonischer Monarchen, die in der Amarna-Korrespondenz auftauchen, verlässlichen mesopotamischen Quellen zufolge zu einer anderen Zeit als Assuruballit I. herrschten.

Auch die Datierung der Sternaufgänge muss hinterfragt werden. Sie setzt voraus, dass der seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. gebräuchliche ägyptische Wandelkalender niemals reformiert wurde, obwohl er dem realen Sonnenjahr immer mehr vorauseilte – das nach diesem Kalender bestimmte Jahr war einen viertel Tag kürzer als das Sonnenjahr.

Hinweise auf eine Kalenderreform

Sollte sich nie ein Hochrangiger daran gestört haben, dass das Neujahr immer weiter vom Beginn der Überschwemmung abrückte, dass im Jahresverlauf wichtige religiöse Feste nicht nach dem offiziellen Kalender ausgerichtet werden konnten? Und wenn dieser den Ägyptern tatsächlich als heilig galt, wie gemeinhin als Argument angeführt wird, galt dies wirklich auch für Fremdherrscher? Tatsächlich soll Manetho, der erste Chronist Ägyptens, von einer Kalenderreform unter den aus Vorderasien stammenden Hyksos berichtet haben, doch diese Information ist wenig verlässlich. Erstens kennen wir nur Auszüge seines Werks aus Zitaten anderer Autoren, zweitens zeigt das wenige Bekannte, dass seine eigenen Quellen aus heutiger Sicht eine politisch gefärbte Sicht der Dinge wiedergaben.

Doch eine vor Kurzem veröffentlichte Analyse antiker astronomischer Beobachtungen des Briten David Lappin scheint den Bericht zu bestätigen. Der Amateur-Astronomiehistoriker rekonstruierte eine Folge von Monddaten aus den so genannten Ilahun-Papyri, die wahrscheinlich zur Zeit Sesostris III., eines Pharaos der 12. Dynastie, verfasst wurden, und prüfte, unter welchen Bedingungen sie mit astronomischen Berechnungen anhand moderner Tabellen optimal übereinstimmten. Die meisten Treffer erhielt Lappin, nachdem er zum einen das Sothis-Datum als Anker des Mittleren Reichs aufgegeben hatte und die Regierungszeit des Pharaos gut 130 Jahre später als gewöhnlich ansetzte. Zum anderen, indem er von einer Kalenderreform in der nachfolgenden Hyksos-Zeit ausging, und zwar eine Verschiebung des Kalenders um drei Monate. Wie alle derartige Studien musste Lappin beispielsweise auch Annahmen über die Techniken der Mondbeobachtung treffen. Immerhin gelang ihm mit ähnlicher Methode eine hohe Übereinstimmung von Venusbeobachtungen aus altbabylonischer Zeit (Mitte des 2. Jahrtausends v. Chr.) mit astronomischen Berechnungen.

Inzwischen gibt es auch erste archäologische Anhaltspunkte für ein Überdenken der Chronologie Ägyptens im 2. Jahrtausend v. Chr. So hat Rupert Chapman vom Britischen Museum in London kürzlich nachgewiesen, dass eine Königsinschrift des Pharaos Schoschenk I., der eigentlich im späten 10. Jahrhundert regiert haben soll, aus einer um 1000 v. Chr. datierten Schicht stammte. Skarabäen mit einem Hinweis auf Pharao Siamun, der angeblich um die Mitte des 10. Jahrhunderts regierte, waren im archäologischen Kontext der Eisenzeit IB Palästinas entdeckt worden, sollten also aus dem 11. Jahrhundert v. Chr. stammen. Stimmt die Datierung der Pharaonen, wären die Schichten jeweils etwa 100 Jahre jünger als bisher angenommen. Regierten die Könige sogar erst im 9. Jahrhundert – wie Chapman und auch wir vermuten –, wächst der Versatz.

Eine Änderung der Chronologie würde nicht nur Probleme der Bibelarchäologie, sondern auch solche der Ägyptologie lösen. Beispielsweise irritieren Stammbäume von Herrschern, aber auch anderer Hochrangiger aus der Dritten Zwischenzeit (11. Jahrhundert v. Chr.) und der Spätzeit Ägyptens (1. Jahrtausend v. Chr.): Sofern nicht zahlreiche Namen fehlen, hätten viele Menschen für ihre Zeit ungewöhnlich lang gelebt. Es sei denn, diese Perioden wären um bis zu 200 Jahren kürzer gewesen, als es die konventionelle Chronologie vorsieht. Eine Lösung, die der dänische Ägyptologe Jens Lieblein bereits 1914 vertrat. Heute ist die Zeit reif für eine Korrektur. ◁

J. SCHWEINSBERG, MIT FRDL. GEN. VON PETER VAN DER VEEN

Archäologische Schichten werden häufig nach Stilen der ausgegrabenen Keramikfragmente datiert. Zudem gibt die Häufigkeit der Funde Anhaltspunkte dafür, wie dicht ein Ort besiedelt war.

Peter James (links) studierte Alte Geschichte an der University of Birmingham und arbeitet als freier Buchautor. Der Bibelarchäologe **Peter van der Veen** forscht an den Universitäten Bristol und Mainz.

Finkelstein, I., Silberman, N. A.: Keine Posaunen vor Jericho. Die Archäologische Wahrheit über die Bibel. C.H.Beck, München 2002.

James, P. et al.: Centuries of Darkness. Jonathan Cape, London 1991.

Lappin, D.: Illahun Lunar Texts and the Astronomical Dating of the 12th Dynasty. In: Zerbst, U., Veen, P. van der (Hg.): Abraham und seine Welt. Hänssler, Holzgerlingen, voraussichtlich 2009.

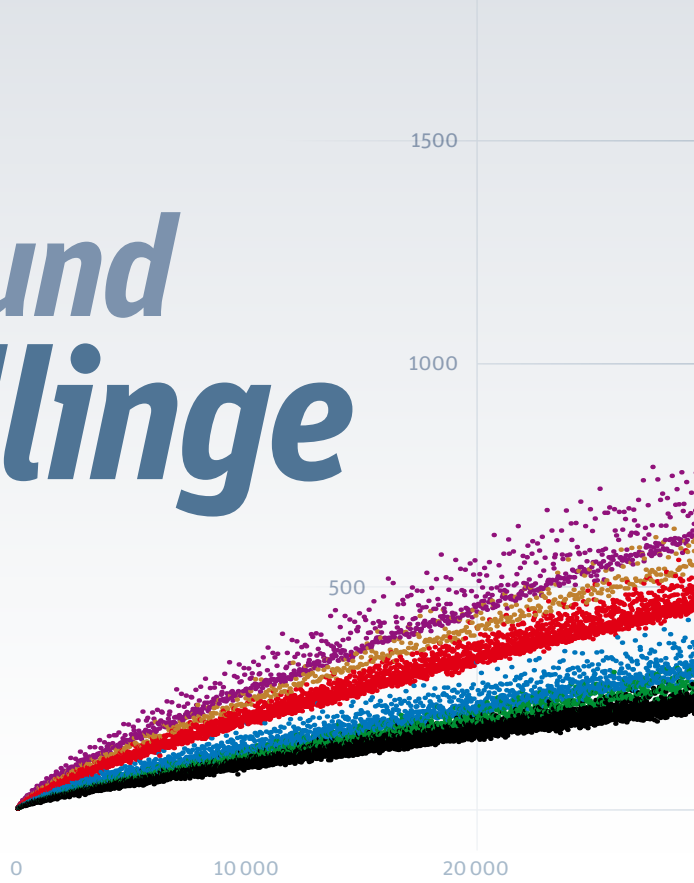
Levy, T., Higham, T. (Hg.): The Bible and Radiocarbon Dating, Archaeology, Text and Science. Equinox, London 2005.

Zerbst, U., Veen, P. van der (Hg.): Keine Posaunen vor Jericho? Hänssler, Holzgerlingen 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972373.

Goldbach und die Zwillinge

Primzahlen sind die geheimnisvollen Grundbausteine der Mathematik. So weiß bis heute niemand, ob sich jede ganze Zahl als Summe zweier Primzahlen schreiben lässt und wie viele Zwillinge unter ihnen zu finden sind.



Von Wolfgang Blum

Einfach klingende Fragen können sich in der Mathematik als äußerst vertrackt herausstellen. Die besten Beispiele stammen aus der Forschung über Primzahlen, jene natürlichen Zahlen, die sich nur durch 1 und sich selbst ohne Rest teilen lassen: 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29 … Für Don Zagier vom Max-Planck-Institut für Mathematik in Bonn »gehören sie trotz ihrer einfachen Definition zu den willkürlichsten, widerspenstigsten Objekten, die der Mathematiker studiert. Sie wachsen wie Unkraut unter den natürlichen Zahlen, scheinen keinem anderen Gesetz als dem Zufall unterworfen«. Zugleich zeigten sie aber »die ungeheuerlichste Regelmäßigkeit auf und sind durchaus Gesetzen unterworfen, denen sie mit fast peinlicher Genauigkeit gehorchen«.

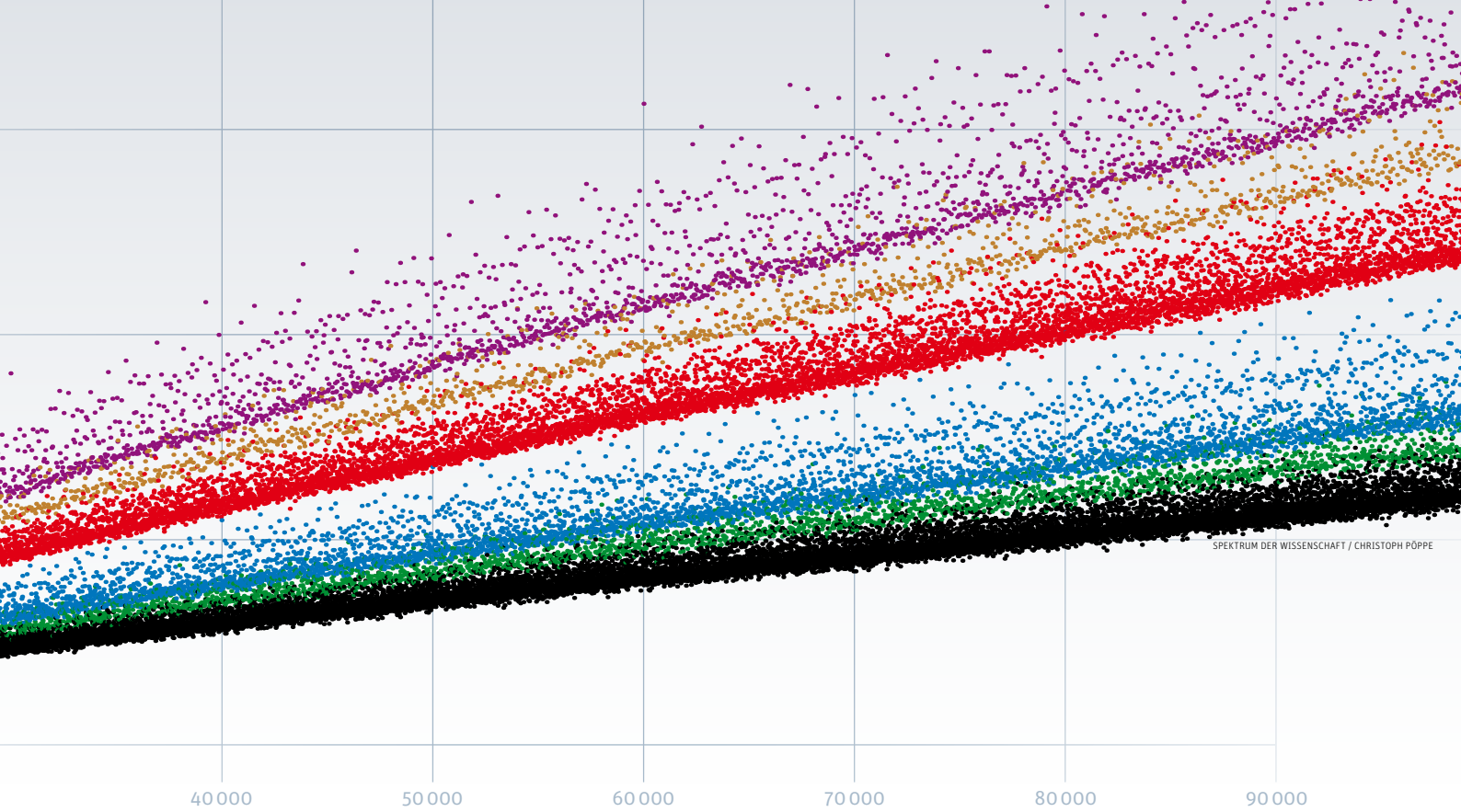
Im Jahr 1742 schrieb der deutsche Gelehrte Christian Goldbach (1690–1746) an seinen Freund, den berühmten Mathematiker Leonhard Euler (1707–1783), er vermute, jede ganze Zahl größer als 5 lasse sich als Summe von drei Primzahlen schreiben. Euler formulierte in seiner Antwort an Goldbach dessen Aussage in eine gleichwertige Behauptung um: »Jede gerade Zahl ≥ 4 ist die Summe zweier Primzahlen.« Beispiele: $8 = 5 + 3$, $22 = 11 + 11$ und $100 = 53 + 47$. An einem Beweis scheiterte Euler genauso wie alle seine Nachfolger in den nächsten 266 Jahren. Bis heute haben sich die Mathematiker zwar an die Vermutung herangepirscht, an einem vollständigen Beweis bissen sich indes auch die größten Meister die Zähne aus.

Dabei hätte dem Bezwinger der Vermutung nicht nur der Ruhm und die Anerkennung der Fachwelt gewunken, sondern zeitweise sogar eine Million Dollar. Diesen Preis lobten im Jahr 2001 zwei Verlage aus. Die Unternehmen wollten damit freilich weniger den Fortschritt der Mathematik fördern als Werbung treiben für den bei ihnen erschienenen Roman »Onkel Petros und die Goldbachsche Vermutung« von Apostolos Doxiadis, in dem die Hauptperson mit dem Beweis ringt (Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 108). Da binnen eines Jahres niemand die Vermutung knackte, zogen die Verlage ihren Preis zurück.

Goldbachs Vermutung ist eng verknüpft mit einem anderen Primzahlenproblem, das ebenfalls so manchen Wissenschaftler ergrauen ließ: »Gibt es unendlich viele Primzahl-

SERIE: DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

Teil I:	Interview mit Gerd Faltings Die riemannsche Vermutung	SdW 09/2008
Teil II:	Das Komplexitätsproblem P = NP	SdW 10/2008
Teil III:	Goldbachsche Vermutung und Primzahlzwillingsvermutung	SdW 12/2008
Teil IV:	Die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer	SdW 01/2009
Teil V:	Das abc-Problem	SdW 02/2009
Teil VI:	Das Yang-Mills-Problem	SdW 03/2009
Teil VII:	Das Navier-Stokes-Problem	SdW 04/2009



Über jeder geraden Zahl *n* zwischen 4 und 100 000 ist hier die Anzahl *G*(*n*) der Möglichkeiten aufgetragen, *n* als Summe zweier Primzahlen auszudrücken. Ein Datenpunkt ist rot gefärbt, wenn *n* durch 3 teilbar ist; Vielfache von 5 sind blau und Vielfache von 7 grün dargestellt. Mischfarben kennzeichnen die Zahlen, die durch mehrere dieser kleinen Primzahlen teilbar sind: violett für Vielfache von 3 · 5 = 15, goldbraun für solche von 3 · 7 = 21. Bei aller scheinbar zufälligen Streuung der Datenpunkte sind doch Trends erkennbar: Eine gerade Zahl hat umso mehr Zerlegungen, je mehr kleine Teiler sie hat.

zwillinge?« Schon Euklid bewies vor über 2000 Jahren, dass die Folge der Primzahlen niemals endet, es also unendlich viele davon gibt. Wie ist es aber mit Primzahlpaaren mit dem Abstand 2? Die ersten solchen Zwillinge sind: 3 und 5, 5 und 7, 11 und 13, 17 und 19, 41 und 43, 71 und 73. Lassen sich auch da unendlich viele finden?

Obwohl die Frage naheliegt, wissen wir nicht, ob sich die Griechen der Antike bereits den Kopf darüber zerbrachen. Erstmals schriftlich formuliert hat sie Alphonse de Polignac (1817–1890) im Jahr 1849. Der Franzose vermutete allgemeiner, dass es für jeden geraden Abstand unendlich viele Primzahlenpaare gebe.

Mathematik zur Entspannung

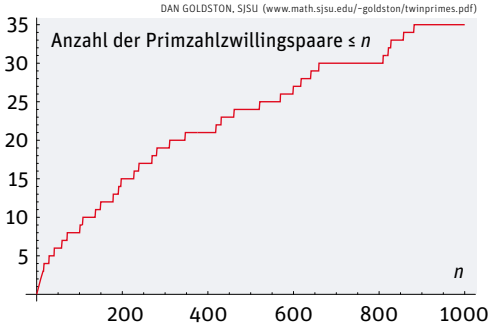
Doch die Primzahlen, die scheinbar willkürlich mal nahe beieinander, dann wieder mit großen Lücken in den natürlichen Zahlen verstreut sind, schlugen den Forschern immer wieder ein Schnippchen. Trotz Fortschritten knabbert die Zunft bis heute vergebens an einem Beweis für Polignacs Vermutung.

Zurück zu Goldbach: Der Deutsche aus Königsberg hatte hauptsächlich Jura und Medizin studiert, mit Mathematik beschäftigte er sich nur zur Entspannung. Dabei liebte er es, mathematische Vermutungen aufzustellen, eine Leidenschaft, die er mit Euler teilte. Nicht immer lagen die Freunde dabei richtig. So behauptete Goldbach in einem späteren Brief an Euler, jede ungerade Zahl lasse sich als die Summe aus einer Primzahl und dem Doppelten einer Quadratzahl schreiben. So ist etwa $11 = 3 + 2 \cdot 2^2$ oder $23 = 5 + 2 \cdot 3^2$. Euler antwortete ihm, er habe die Behauptung für alle Zahlen bis 1000 geprüft. Später bestätigte er sie sogar bis 2500. Dennoch ist sie falsch, wie der Göttinger Mathematiker Moritz Stern (1807–1894) ein Jahrhundert später herausfand. Die Zahlen 5777 und 5993 lassen sich nicht als eine derartige Summe schreiben. Bis heute sind jedoch keine weiteren Gegenbeispiele bekannt.

Seine berühmteste Vermutung stellt indes niemand in Frage. Bis zum Ende des 19. Jahrhundert hatten fleißige Rechner sie für alle Zahlen bis 10 000 geprüft. In den vergangenen Jahrzehnten verifizierten sie Wissenschaftler mit Computerhilfe für mehr als die erste Trillion Zahlen, genauer für alle Zahlen unter $1{,}2 \cdot 10^{18}$.

Ordnen wir jeder natürlichen Zahl n die Anzahl der Möglichkeiten zu, sie als Summe zweier Primzahlen zu schreiben, ist damit die Goldbach-Funktion $G(n)$ definiert. Für kleine

DAN GOLDSTON, SJSU (www.math.sjsu.edu/~goldston/twinprimes.pdf)



Wie die Primzahlen selbst sind Primzahlzwillinge relativ häufig unter den kleinen Zahlen und werden allmählich seltener. Schon früh, etwa zwischen 670 und 800, gibt es weite Bereiche ohne ein einziges Zwillingspaar.

CHINESISCHE POST

Chen Jing Run (1933 – 1996), auf dieser chinesischen Briefmarke abgebildet mit einer der Schätzformeln für die Anzahl der Primzahlzwillinge, konnte eine gemilderte Form der goldbachschen Vermutung beweisen.

Zahlen lässt sich der Wert von G mühelos bestimmen. So ist etwa $G(4) = 1$, denn außer $4 = 2 + 2$ gibt es keine weitere Möglichkeit, die 4 als Summe zweier Primzahlen zu schreiben. $G(6)$ und $G(8)$ sind ebenfalls gleich 1 ($6 = 3 + 3$, $8 = 3 + 5$). $G(10)$ hingegen ist 2, denn $10 = 3 + 7 = 5 + 5$. Die goldbachsche Vermutung lautet nun: $G(n) > 0$ für alle geraden Zahlen n, die größer als 2 sind.

$G(n)$ ist außer für ganz kleine n meist angenehm groß. $G(1000)$ etwa ist bereits 28, $G(10\,000)$ gar 127. Dass es da ausgerechnet eine Zahl geben soll, für die G null wird, ist kaum denkbar. Den Computerrechnungen zufolge müsste sie größer als eine Trillion sein. Und unter den berechneten Zahlen gibt es keine einzige, für die $G(n)$ der Null auch nur nahekäme, im Gegenteil (Bild S. 94/95 oben).

Ein stochastisches Argument spricht ebenfalls für Goldbach. Man tut dabei so, als seien die Primzahlen zufällig verteilt. Das stimmt zwar nicht; aber die Primzahlen erscheinen so regellos auf der Zahlengeraden verstreut, dass ihre Anordnung von einer zufälligen praktisch nicht zu unterscheiden ist. Mit der Fiktion einer Zufallsverteilung kann man zwar nichts beweisen, aber erstaunlich gute Schätzungen gewinnen.

Nach dem Primzahlsatz von Carl Friedrich Gauß (1777 – 1855) gilt, dass die Anzahl der Primzahlen, die kleiner sind als eine Zahl n, ungefähr gleich n geteilt durch den Logarithmus von n ist (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86). In Formeln: $\pi(n) \approx n / \log n$. Dabei bezeichnet $\log n$ den natürlichen Logarithmus, das heißt den Logarithmus zur Basis e. Zum Beispiel beträgt der Schätzwert für die Anzahl der Primzahlen unter einer Million $1\,000\,000 / \log 1\,000\,000 \approx 72\,382$; der korrekte Wert ist 78 498.

$G(2\,000\,000)$ ist nur dann null, wenn für jede dieser über 70 000 Primzahlen p die Zahl $2\,000\,000 - p$ nicht prim ist. Da p als Primzahl auf alle Fälle ungerade ist, muss auch $2\,000\,000 - p$ ungerade sein. Aus dem gaußschen Primzahlsatz lässt sich folgern, dass die Wahrscheinlichkeit für eine große ungerade Zahl n, Primzahl zu sein, ungefähr $2 / \log n$ beträgt. Zum Beispiel liegt die Wahrscheinlichkeit, dass 1 000 001 eine Primzahl ist, bei rund $2 / \log 1\,000\,001 = 0{,}1447\ldots$

Nun können wir die Wahrscheinlichkeit dafür kalkulieren, dass die Goldbach-Funktion bei 2 000 000 gleich null ist. Zu jeder der reichlich 78 000 Primzahlen p unterhalb einer Million untersuchen wir, ob $2\,000\,000 - p$ prim ist. Gilt dies für eine der Zahlen, so haben wir ein Goldbach-Paar gefunden, und $G(2\,000\,000)$ kann nicht mehr null sein. Die potenziellen Partner unserer gut 78 000 Primzahlen sind alle ungerade und liegen zwischen 1 000 000 und 2 000 000. Für jede von ihnen bewegt sich die Wahrscheinlichkeit, eine Primzahl zu sein, zwischen $2 / \log 1\,000\,000 = 0{,}1447\ldots$ und $2 / \log 2\,000\,000 = 0{,}1378$. Die erwartete Anzahl von Primzahlen beträgt somit mindestens $78498 \cdot 0{,}1378 = 10\,817$. $G(2\,000\,000)$ sollte daher vier- oder sogar fünfstellig sein und keineswegs null.

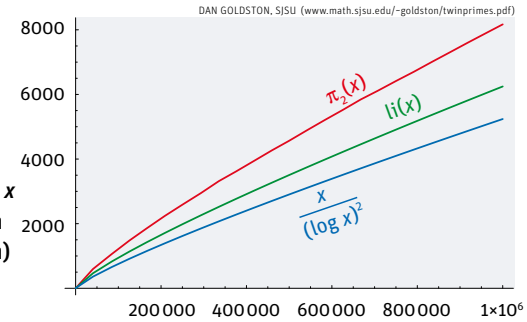
Primzahlen als Zufallstreffer

Aus der Annahme von der zufälligen Verteilung der Primzahlen folgt auch eine stochastische Unabhängigkeit: Ob eine Zahl eine Primzahl ist und eine andere auch, sind sozusagen zwei voneinander unabhängige Ereignisse. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass beide zusammen auftreten, ist dann gleich dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten.

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine ungerade Zahl zwischen einer und zwei Millionen keine Primzahl ist, beträgt, wie oben berechnet, höchstens $1 - 0{,}1378\ldots$ Also ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass für die Zahl 2 000 000 keiner der potenziellen Goldbach-Partner der 78 498 Primzahlen unter einer Million prim ist, gleich $(1 - 0{,}1378)^{78\,498} \approx 2 \cdot 10^{-5055}$. Das Risiko, dass G für die Zahl 2 000 000 tatsächlich auf null sinkt, ist demnach mit 1 zu $0{,}5 \cdot 10^{5055}$ unvorstellbar gering.

Der Engländer Neil Sheldon hat mit dieser Methode im Jahr 2003 die Wahrscheinlichkeit überschlagen, dass die goldbachsche Vermutung für Zahlen größer als $4 \cdot 10^{14}$ scheitert. Für kleinere Zahlen war sie damals bereits durch Computerberechnungen belegt. Sein Ergebnis: 1 zu $10^{150000000000}$. »Diese Wahrscheinlichkeit ist 1 zu einer Million Millionen Millionen …, wobei man 25 Milliarden mal Million zu sagen hat«, resumiert er. Hätte Goldbach 1742 angefangen, die Zahl auszusprechen und zweimal pro Sekunde das Wort »Million« über die Lippen gebracht, wäre er heute noch lange nicht fertig.

So überzeugend die Überlegung klingt, sie ist ebenso wenig wie die Computerjagd ein Beweis. Dem Ziel, einen solchen zu finden, kamen die Mathematiker in den ersten 150 Jahren nach Goldbachs berühmtem Brief



Die Anzahl der Primzahlzwillinge $\pi_2(x)$ (hier bis zu einer Million; rot) übertrifft für jedes x die Werte der Schätzfunktionen li(x) (Integrallogarithmus; grün) und $x/(\log x)^2$ (blau).

kaum näher. Erst im 20. Jahrhundert gelangen die ersten Fortschritte. So bewiesen Godfrey Hardy (1877–1947) und John Littlewood (1885–1977), dass jede genügend große ungerade Zahl die Summe dreier Primzahlen ist. Dabei mussten die beiden englischen Zahlentheoretiker allerdings voraussetzen, dass die bis heute unbewiesene riemannsche Vermutung richtig ist (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86). Iwan Winogradow (1891–1983) erreichte 14 Jahre später das gleiche Ziel, ohne die Gültigkeit der riemannschen Vermutung vorauszusetzen. Was genügend groß heißt, haben Wissenschaftler anschließend näher untersucht und Schranken dafür angegeben. Die niedrigste ist aber mit ihren mehr als 7000 Stellen immer noch riesig. 1997 schließlich bewiesen vier Mathematiker die so genannte schwache goldbachsche Vermutung – jede ungerade Zahl größer 5 ist Summe dreier Primzahlen – auch ohne untere Schranke. Allerdings mussten sie eine Vermutung voraussetzen, die der von Riemann ähnlich ist.

Einen anderen Ansatz verfolgte der Russe Lew Schnirelman (1905–1938). Er bewies in den 1930er Jahren, dass jede genügend große Zahl Summe von höchstens 300000 Primzahlen ist. Seitdem versuchen die Mathematiker, Schnirelmans Grenze von 300000 auf einen handlicheren Wert zu drücken. Seit gut zehn Jahren ist bekannt, dass sechs Primzahlen auf alle Fälle ausreichen.

Der Norweger Viggo Brun (1882–1978) überlegte sich hingegen, die Voraussetzung »Primzahl« aufzuweichen. Eine Primzahl besteht nur aus einem einzigen Faktor; dann ist doch irgendwie eine Zahl, die aus nur zwei Faktoren besteht, »fast eine Primzahl«. Brun bezeichnete eine Zahl als k-Fastprimzahl, wenn sie das Produkt von genau k Primzahlen ist. So ist 12 eine 3-Fastprimzahl, denn $12 = 2 \cdot 2 \cdot 3$, und 420 eine 5-Fastprimzahl, da $420 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7$. Brun bewies 1919, dass sich jede genügend große gerade Zahl als Summe zweier 9-Fastprimzahlen schreiben lässt. Er entwickelte dabei eine Vorlage aus der Antike weiter: Das Sieb des Eratosthenes filtert die Primzahlen aus den natürlichen Zahlen heraus, in dem aus letzteren zuerst alle Vielfachen von 2, dann alle Vielfachen von 3, von 5, von 7 und so weiter gestrichen werden. Die Zahlen, die nach dem Aussieben übrig bleiben, sind die Primzahlen.

Knapp 60 Jahre später verbesserte Chen Jing Run (1933–1996) das Ergebnis von Brun. Statt zweier 9-Fastprimzahlen genügten dem Chinesen eine Primzahl und eine 2-Fastprimzahl. »Das war ein spektakulärer Durchbruch«, erinnert sich Pieter Moree vom Bonner Max-Planck-Institut für Mathematik. Bis heute sei es leider der letzte gewesen.

Chen bewies überdies, dass es unendlich viele Primzahlen p gibt, für die $p+2$ eine 2-Fastprimzahl ist. Damit kam er einem Beweis, dass es unendlich viele Primzahlzwillinge gibt, bereits sehr nahe.

Niemand zweifelt ernsthaft an der Gültigkeit der goldbachschen Vermutung. Aber bewiesen ist sie immer noch nicht

Beim Problem der Primzahlzwillinge geht es den Mathematikern ähnlich wie bei Goldbachs Vermutung. Sie sind sich eigentlich über das Ergebnis sicher, allein es fehlt der Beweis. Bis heute haben sie auf rund 100 mehr oder weniger verschiedene Arten bewiesen, dass es unendlich viele Primzahlen gibt. Doch keine einzige der Arbeiten ließ sich auf die Zwillinge ummünzen.

Zahlenjagd im Internet

Als Kandidaten für Primzahlzwillinge kommen nur Zahlen der Form $6n-1$ und $6n+1$ in Frage. Denn teilt man eine Primzahl durch 6, muss der Rest 1 oder 5 ergeben. Beim Rest 0 könnte man die Zahl nämlich durch 6 teilen, bei den Resten 2 und 4 durch 2 und beim Rest 3 durch 3. Zwischen den Partnern eines Zwillingspaars muss also ein Vielfaches von 6 liegen. Also lässt sich der größere als $6n+1$ schreiben und der kleinere als $6n-1$.

Die Jagd nach sehr großen Primzahlzwillingen läuft heute über das Internet. Jeder Interessierte kann sich das Programm herunterladen und seinen Computer nach Zwillingen forschen lassen, wenn er gerade Rechenkapazität frei hat. Derzeit liegt der Rekord bei $2003663613 \cdot 2^{195000} \pm 1$, das sind zwei Zahlen mit immerhin fast 59000 Dezimalstellen.

GEMÄLDE VON EMANUEL HANDMANN, 1753

Falscher Verdacht

Leonhard Euler (1707 – 1783) gilt als der produktivste Mathematiker aller Zeiten. Seine gesammelten Werke umfassen mehr als 70 Bände. Fast die Hälfte davon entstand, als er bereits über 60 Jahre alt und erblindet war. Sein Gebrechen nahm er übrigens mit einem ganz eigenen Humor. Als er die Sehkraft auf dem rechten Auge infolge eines Fiebers verlor, kommentierte er trocken: »Nun werde ich weniger abgelenkt sein.«

Zuweilen langen aber auch Meister daneben. So behauptete Euler, es gebe keine ganzen Zahlen x, y, z und w, die folgende Gleichung erfüllten: $x^4 + y^4 + z^4 = w^4$. Mehr als 200 Jahre lang blieb die Vermutung offen. Erst im Jahr 1988 fand Noam Elkies von der Harvard University ein Gegenbeispiel: $2682440^4 + 15365639^4 + 18796760^4 = 20615673^4$. Für Mathematiker ist eine Behauptung eben noch lange nicht richtig, bloß weil sie für die ersten paar Millionen Zahlen gilt.

Sie beide aufzuschreiben würde fünfmal so viel Platz benötigen wie dieser Artikel.

Primzahlzwillinge gibt es deutlich seltener als Primzahlen. Unter den ersten hundert Zahlen sind nur acht Pärchen gegenüber 25 Primzahlen. Unterhalb einer Milliarde gibt es mehr als 50 Millionen Primzahlen, aber nur knapp dreieinhalb Millionen Zwillingspaare (Bilder S. 95 unten und S. 96 unten). Addiert man die Kehrwerte der Primzahlen, wächst die Summe über alle Grenzen:

$$\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{5}+\frac{1}{7}+\frac{1}{11}+\frac{1}{13}+\frac{1}{17}+\ldots=\infty\,,$$

wie Euler 1737 bewies. Als dagegen Viggo Brun 1919 die Kehrwerte der Primzahlzwillinge summierte, stellte er fest, dass der sich ergebende Wert beschränkt bleibt:

$$\left(\frac{1}{3}+\frac{1}{5}\right)+\left(\frac{1}{5}+\frac{1}{7}\right)+\left(\frac{1}{11}+\frac{1}{13}\right)$$
$$+\left(\frac{1}{17}+\frac{1}{19}\right)+\left(\frac{1}{41}+\frac{1}{43}\right)+\ldots=B$$

Heute ist dieser Wert B als brunsche Konstante bekannt und bis auf viele Nachkommastellen berechnet: $B=1{,}90216\ldots$ Und das, obwohl nach wie vor nicht sicher ist, ob es unendlich viele Zwillinge gibt, ob also unendlich viele Summanden zu addieren sind. Denn in der Mathematik sind viele unendliche Summen bekannt, die einen endlichen Wert ergeben. So addiert sich etwa die Summe der Kehrwerte von Zweierpotenzen zu 2:

$$1+\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\frac{1}{8}+\frac{1}{16}+\frac{1}{32}+\ldots=2$$

Die Fachwelt spricht vom brunschen Witz und vergleicht die Situation mit jemandem, der zwar keine Ahnung hat, wie viel Geld er im Portmonee hat, aber trotzdem weiß, wie viel er sich davon kaufen kann.

Die brunsche Konstante wurde 1994 sogar relevant für die Praxis. In jenem Jahr wollte Thomas Nicely sie genau ausrechnen und verwendete dazu sicherheitshalber zwei verschiedene Computer. Als der Mathematikprofessor aus Virginia die Kehrwerte von 824633702441 und 824633702443 berechnete, lieferten seine Rechner in beiden Fällen unterschiedliche Ergebnisse. Der Grund dafür war ein Fehler in der Hardware des Pentium-Prozessors von Intel. Der Firma brachte der »Pentium-Bug« nicht nur Verluste in Millionenhöhe ein, sondern auch weltweiten Spott. »Intel inside – can't divide« (kann nicht dividieren) war noch einer der harmloseren Sprüche, die damals kursierten.

In den letzten Jahren glaubten Mathematiker mehrfach, das Problem mit der Unendlichkeit der Primzahlzwillinge endlich geknackt zu haben. So veröffentlichte Richard Arenstorf, emeritierter Professor der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee), vor vier Jahren einen Beweis, der sich auf die riemannsche Zeta-Funktion stützt (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86). Doch steckte ein Fehler in der Beweisführung, den er bis heute nicht ausbügeln konnte. Nicht besser erging es dem Kalifornier Daniel Goldston und dem Türken Cem Yıldırım.

Umsonst waren die Mühen indes nicht. Denn die Wissenschaftler haben Theorien entwickelt, mit denen sich andere mathematische Sätze und vielleicht sogar eines Tages die Unendlichkeit der Primzahlzwillinge verifizieren lassen. So halfen die Methoden von Goldston und Yıldırım zu beweisen, dass es in den Primzahlen beliebig lange arithmetische Folgen gibt, also Folgen von Zahlen mit gleichem Abstand (Spektrum der Wissen-

MIT FRDL. GEN. VON WLODZIMIERZ KUPERBERG

Das Buch der Beweise

Paul Erdös (1913–1996) war ein bemerkenswerter Zeitgenosse. Fast 60 Jahre seines Lebens reiste der ungarische Mathematiker durch die Welt, besuchte Kollegen und stellte mit ihnen neue Theoreme auf, viele davon über Primzahlen. Einen festen Wohnsitz hatte er nicht.

Sein größtes Ziel dabei war, einen Blick in das BUCH zu werfen, in dem Gott die elegantesten Beweise aufbewahre. Von Gott, an den er gar nicht glaubte, sprach er nur als dem SF, dem *»supreme fascist«* (obersten Faschisten). Eine von dessen Grausamkeiten sei es, der Menschheit das BUCH vorzuenthalten. Nur mit viel Intelligenz und Fleiß gelinge es Mathematikern, ab und zu einen Blick hinein zu erhaschen.

Nach Erdös' Tod 1996 brachten Kollegen von ihm eine irdische Fassung des BUCHs heraus (Bild rechts). Sie beginnt mit dem euklidischen Beweis für die Unendlichkeit der Primzahlen, der für den kleinen Paul ein Schlüsselerlebnis darstellte. »Als ich zehn war, erzählte mir mein Vater vom euklidischen Beweis, und ich hatte angebissen«, erinnerte sich Erdös einmal. Auf den Beweis des Griechen folgen fünf weitere Nachweise dafür, dass die Reihe der Primzahlen endlos ist. Keine dieser schönen Argumentationen konnten die Mathematiker aber bis heute auf die Primzahlzwillinge umstricken.

schaft 4/2005, S. 114). 199, 409, 619, 829, 1039, 1249, 1459, 1669, 1879, 2089 ist zum Beispiel eine solche Primzahlfolge der Länge 10. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Zahlen beträgt bei ihr stets 210.

Goldston und Yıldırım verwenden wie ihre Kollegen bei der Goldbach-Vermutung wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden, insbesondere den gaußschen Primzahlsatz. Demnach ist die Wahrscheinlichkeit, dass sowohl n als auch $n+2$ Primzahlen sind, gleich $(1/\log n) \cdot (1/\log(n+2))$, was für große n praktisch gleich $(1/\log n)^2$ ist (der Unterschied zwischen $\log n$ und $\log (n+2)$ ist vernachlässigbar). Daraus ergibt sich eine Schätzung für die Anzahl der Primzahlzwillinge $\leq n$: $\pi_2(n) \approx n/(\log n)^2$.

Primzahlen mit geringem Abstand

Wie ein Vergleich der Zahlenwerte zeigt (Bild S. 96 unten), handelt es sich um eine deutliche Unterschätzung. Der Grund liegt darin, dass die Fiktion der Unabhängigkeit für so eng benachbarte Zahlen nicht aufrechtzuerhalten ist. Wenn wir schon wissen, dass n eine Primzahl ist, dann ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass $n+2$ durch 2 teilbar ist, nicht 1/2, wie das für eine beliebig herausgegriffene Zahl der Fall wäre, sondern 0. Wir wissen ja schon, dass $n+2$ ungerade sein muss. Andererseits beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass $n+2$ durch 3 teilbar ist, nicht 1/3, wie der Unabhängigkeitsannahme entspräche, sondern 1/2. Denn wenn n eine Primzahl ist, ergibt n geteilt durch 3 entweder den Rest 1 oder 2, und nur bei Rest 2 ist auch $n+2$ nicht durch 3 teilbar.

Daraus ergibt sich ein Korrekturfaktor, den Mathematiker als 1,32032… berechnet haben. Also wäre $\pi_2(n) \approx 1{,}32\ldots \cdot n/(\log n)^2$. Leider ist das aber nur eine der vielen unbewiesenen Vermutungen der Primzahlforschung. Bislang ist lediglich eine grobe Abschätzung verifiziert: $\pi_2(n) \leq 4 \cdot 1{,}32\ldots \cdot n/(\log n)^2$.

Goldston und Yıldırım gingen das Problem von einer anderen, immer noch wahrscheinlichkeitstheoretischen Seite an. Unter den ersten 1 000 000 natürlichen Zahlen ist nach dem gaußschen Primzahlsatz ungefähr jede vierzehnte eine Primzahl, denn $\log(1\,000\,000) = 13{,}81\ldots$ Diese Zahl ist also der Durchschnittsabstand zweier benachbarter Primzahlen innerhalb der ersten Million. Bis zur ersten Billion steigt er auf das Doppelte an ($\log(10^{12}) = 27{,}63\ldots$).

Die Frage ist nun, ob es auch große Primzahlen gibt, die deutlich näher beieinanderliegen als der Durchschnitt. Goldston und Yıldırım führten dazu eine Normierung durch. Statt direkt den Abstand benachbarter Primzahlen – nennen wir sie p_k und p_{k+1} – zu betrachten, teilten sie diesen durch den erwarteten Abstand $\log p_k$. Sie studierten damit die Zahlenfolge $(p_{k+1} - p_k)/\log p_k$.

Sollte es unendlich viele Primzahlzwillinge geben, müsste diese Folge unendlich oft beliebig nahe an die Null kommen. (Für Fachleute: Ihr Limes inferior sollte null sein.) Das und noch etwas mehr hätten sie bewiesen, kündigten die beiden Zahlentheoretiker auf einer Konferenz 2003 in Oberwolfach im Schwarzwald an. Als Andrew Granville von der Université de Montréal (Kanada) die Arbeit prüfte, bemerkte er eine Folgerung, die den Autoren entgangen war. Sollte ihre Argumentation korrekt sein, würde das bedeuten, dass der Abstand zwischen benachbarten Primzahlen unendlich oft kleiner oder gleich 12 wäre. Da nicht mit einer so weit reichenden Aussage zu rechnen war, habe er sich das Paper der beiden umso genauer vorgenommen, erzählt Granville.

Gemeinsam mit einem Kollegen aus den USA entdeckte er tatsächlich einen Fehler, der nicht ohne Weiteres auszubügeln war. Zwei Jahre nach der ersten Ankündigung und mit Hilfe des Ungarn Janos Pintz konnten Goldston und Yıldırım schließlich die Lücke stopfen und endgültig beweisen, dass die genannte Zahlenfolge der Null unendlich oft beliebig nahekommt.

Die Fachwelt zeigte sich hocherfreut über den Fortschritt. »Es war ein wunderbares neues Jahrtausend für unser Verständnis der Verteilung von Primzahlen«, urteilt Granville. Ob das bereits der Durchbruch bei den Primzahlzwillingen war, lasse sich aber nicht absehen, dämpft Pieter Moree die Erwartungen. Daniel Goldston äußert sich ebenfalls vorsichtig: »Eine reizvolle Seite der Zahlentheorie ist, dass es schwierig ist vorherzusagen, welche Probleme mit unserem gegenwärtigen Kenntnisstand gelöst werden können und welche derzeit noch jenseits jeder Hoffnung auf eine Lösung sind.« Goldbach und die Zwillinge bleiben weiter spannend. ◁

Primzahlmehrlinge

Bei Drillingen ist die Sache zunächst einfach. Sie tauchen nur ein einziges Mal in der unendlichen Reihe der Primzahlen auf, und das ganz am Anfang: 3, 5 und 7. Denn von den drei Zahlen n, $n+2$ und $n+4$ muss immer eine durch 3 teilbar sein. Weil das zu simpel wäre, haben Mathematiker die Definition abgeändert. Sie sprechen bei drei Primzahlen der Form n, $n+2$, $n+6$ oder n, $n+4$, $n+6$ von Drillingen. Beispiele sind 5, 7, 11 oder 13, 17, 19.

Vierlinge sind Primzahlen n, $n+2$, $n+6$, $n+8$, also zwei Zwillingspaare im Abstand 4. Beispiele sind 5, 7, 11, 13 oder 101, 103, 107, 109. Auch bei den Drillingen und Vierlingen ist unbekannt, ob es unendlich viele gibt.

Wolfgang Blum ist promovierter Mathematiker, Wissenschaftsjournalist und Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik in Nürnberg. Aus seiner Feder stammen neben zahlreichen Artikeln in namhaften Zeitungen und Zeitschriften das Was-ist-was-Buch über Mathematik und der vergangenes Jahr bei DuMont erschienene »Schnellkurs Mathematik«.

Cipra, B., Mackenzie, D.: What's Happening in the Mathematical Sciences. Bd. 6. American Mathematical Society, Providence (RI) 2007.

Doxiadis, A.: Onkel Petros und die Goldbachsche Vermutung. Lübbe, Bergisch Gladbach 2001.

Granville, A.: A Good New Millenium for the Primes. In: The Madrid Intelligencer (Sonderausgabe von »The Mathematical Intelligencer«), S. 32–36, 2006.

Ribenboim, P.: Die Welt der Primzahlen. Springer, Heidelberg 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972374.

STIMMGERÄT

Wann ist ein »a« ein »a«?

Musik wird störend dann empfunden, ist sie mit Dissonanz verbunden – elektronische Helfer sorgen deshalb für die richtigen Töne.

Von Bernhard Gerl

Ob Klassik, Heavy Metal oder filigraner Jazz – Musik lebt vom Zusammenspiel der Instrumente; genauer gesagt: gestimmter Instrumente, sollen Missklänge nicht den Genuss verderben. Elektronische Stimmgeräte gehören insbesondere in der Amateurliga deshalb zur Grundausstattung.

Was wir als Ton wahrnehmen, ist eine periodische Veränderung des Luftdrucks, die unser Hörsinn aufnimmt und verarbeitet. Als Tonhöhe deutet er die Frequenz der Schwingung, beim Ton a^1 beispielsweise sind es 440 Hertz (Schwingungen pro Sekunde). Zwischen 16 und 20 000 Hertz erstreckt sich der Bereich hörbarer Frequenzen, doch unsere Wahrnehmung bewertet sie ganz unterschiedlich. So empfinden wir einen Ton von 880 Hertz heller als, aber vergleichbar zu a^1. Er wird deshalb als Oktave bezeichnet und a^2 genannt. Oktaven lassen sich durch Frequenzverdopplung auf allen Tönen aufbauen, ebenso kleinere Intervalle wie Terzen, Quarten oder Quinten, deren Frequenzen in bestimmten Verhältnissen zum jeweiligen Grundton stehen (siehe Tabelle). Dass einige dieser Intervalle als harmonisch, andere Intervalle als spannungsgeladen empfunden werden, ist letztlich die Grundlage jeglicher Musik.

Mit dem a^1 hat es eine besondere Bewandtnis: Er diente schon in der Renaissance den Instrumenten eines Ensembles als Referenzton beim Stimmen. Seine Frequenz aber hat sich im Lauf der Musikgeschichte verändert, erst 1939 legte ein internationaler Stimmton-Kongress ihn auf 440 Hertz fest. Das geeignete Referenzinstrument dafür ist die Stimmgabel, deren schwingende Zinken einen sehr reinen Ton erzeugen. Als ihr Erfinder gilt der englische Lautenist John Shore (um 1662 – 1752).

Klingt mein Ton höher oder tiefer als jener der Stimmgabel? Schon diese Frage ist für Amateure oft nicht leicht zu beantworten. Bei Saiteninstrumenten stellt sie sich gleich mehrfach. Stimmpfeifen für die einzelnen Saiten sind eine preiswerte Lösung. Die komfortablere Alternative ist das elektronische Stimmgerät, das sozusagen mithört und den Musiker beim Stimmen unterstützt.

Sofern ein Instrument nicht verstärkt wird und somit ein elektrisches Signal noch nicht zur Verfügung steht, nimmt ein Mikrofon den Ton auf. Der Mikroprozessor des Stimmgeräts analysiert das Signal und zerlegt es mit dem mathematischen Verfahren der schnellen Fouriertransformation (siehe Grafik rechts) in eine Summe von Sinusschwingungen. Das entspricht der physikalischen Realität: Jeder gespielte Ton ist ein Klang, der neben dem Grundton auch ein Spektrum von Obertönen umfasst, die dem Instrument seine Klangfarbe verleihen. Die niedrigste Frequenz vergleicht der Chip mit einer Tabelle von Sollwerten. Ein Display zeigt dann jenen Ton an, der vom gespielten um nicht mehr als einen Viertelton abweicht, die Differenz nach oben oder unten wird ebenfalls dargestellt.

Im Getöse eines Rockkonzerts bietet ein solches Gerät die einzige Chance, rasch zu prüfen, ob die Gitarre noch richtig gestimmt ist. Aber auch mancher professionelle Orchester-Oboist weiß ein Stimmgerät zu schätzen: Wenn die Streicher sein a^1 einmal mehr als zu tief kritisieren, liefert die Elektronik harte Fakten.

Tonhöhe	Intervall	natürliche Stimmung		gleichstufige Stimmung Frequenz (Hz)
		Frequenzverhältnis	Frequenz (Hz)	
c^1	Prime	1/1	264	261,6
d^1	Sekunde	9/8	297	293,7
e^1	Terz	5/4	330	329,6
f^1	Quart	4/3	352	349,2
g^1	Quinte	3/2	396	392,0
a^1	Sexte	5/3	440	440,0
h^1	Septime	15/8	495	493,9
c^2	Oktave	2/1	528	523,2

In der »natürlichen Stimmung« ergeben sich Intervalle als Vielfache der Frequenz des Grundtons der jeweiligen Tonart (hier C-Dur). Im 17. Jahrhundert kam die »wohltemperierte Stimmung« auf, die insbesondere bei Tonartwechseln Vorteile brachte. Sie unterteilt eine Oktave in zwölf etwa gleich große Halbtonschritte à 100 Cent.

Bernhard Gerl ist freier Technikpublizist in Mainz.

Wussten Sie schon?

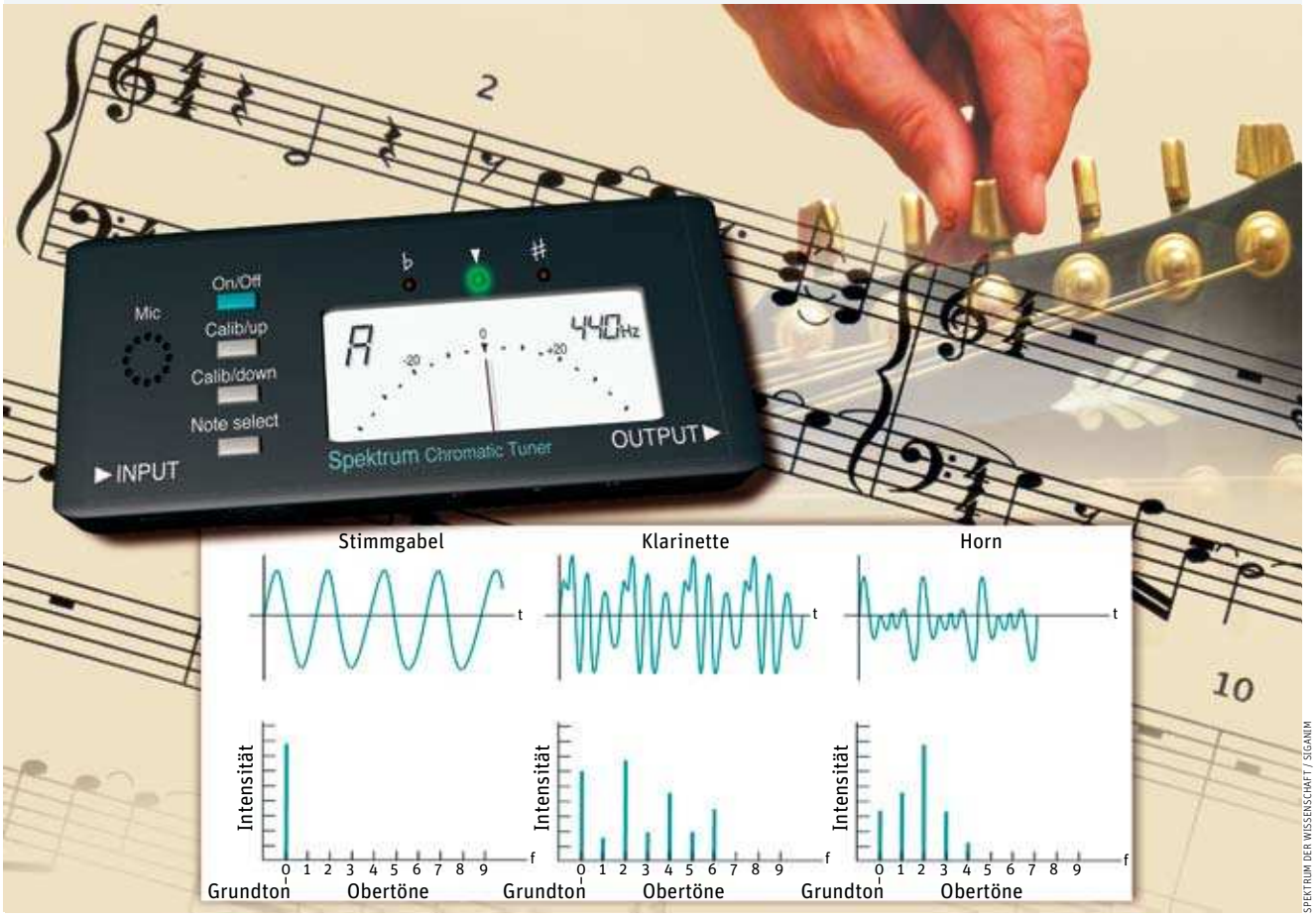
▶ **Kammerton heißt jener Ton**, auf den eine Gruppe ihre Instrumente einstimmt. Dieser kann durchaus vom Norm-a[1] abweichen. So verwenden einige Orchester 442 Hertz oder mehr, um größere Brillanz zu erreichen. Beim Spiel auf historischen Instrumenten richtet sich der Kammerton nach der Epoche: 415 Hertz (ein Halbton unter dem Standard) für Barock- und 430 Hertz für klassische Musik, 438 Hertz für Stücke der Romantik.

▶ **Wer keine Stimmgabel zur Hand hat**, kann auch die Telefonnummer 0043 1 1507 wählen: Das österreichische Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen spielt einen 440-Hertz-Sinuston ins Netz ein. Das Freizeichen der Deutschen Telekom liegt mit 425 Hertz etwa einen Viertelton unter dem Norm-a[1].

▶ **Mehrsaitige Instrumente** werden in Intervallen gestimmt. So beträgt der Tonabstand zwischen den beiden tiefsten Saiten einer Konzertgitarre eine Quarte, bei der Geige eine Quinte. Erfahrene Musiker hören, ob diese Tonabstände korrekt sind, zu groß oder zu klein.

▶ **Eine Gitarre, die sich selbst stimmt**, brachte der amerikanische Hersteller Gibson im vergangenen Dezember auf den Markt. Seine »RoboGuitar« misst die Töne der Saiten und stellt deren Spannung über Elektromotoren ein. Der größte Vorteil: Innerhalb von Sekunden lässt sich das Instrument umstimmen.

▶ **Der griechische Philosoph Pythagoras** (570 – 510 v.Chr.) beschrieb als Erster die natürlichen Intervalle der Obertonreihe. So fand er die Oktave, indem er eine Saite in der Mitte teilte, die Quinte durch Teilung im Verhältnis 2 : 3. Pythagoras war der Ansicht, dass der gesamte Kosmos analog zur Musik einfachen Zahlenverhältnissen gehorche.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM

Ein elektronisches Stimmgerät zeigt die Abweichung eines gespielten Tons vom Soll in einem Intervall von +/– 50 Cent an; das entspricht in der wohltemperierten Stimmung einem Viertelton. Dazu misst das Gerät den Amplitudenverlauf und berechnet daraus mittels Fourieranalyse das Frequenzspektrum, bestehend aus dem gesuchten Grundton sowie Obertönen.

Virtuelle Gartenzwerge im Web 7.0

Wie entwickelt sich das Internet? Und wie verändert es uns? Was wird ein künftiges Web 7.0 bieten? Der Informatikforscher Gunter Dueck versucht eine, bisweilen satirische, Extrapolation.

Von Gunter Dueck

Das Web 1.0 wurde von Wissenschaftlern eher beiläufig erfunden. Es gab dann schnell zu großen technologischen Gedanken Anlass, wie ein Web im Prinzip auszusehen hätte und wie sich die Menschheit damit retten ließe. Die Ökonomen eröffneten dort Shops – so wie vorher im Versandhandel. Es gibt im Web Bibliotheken und Wörterbücher, auch wie vorher. Das »Second Life«, in dem sich jeder einen virtuellen Doppelgänger (Avatar) kreieren kann, ist beinah wie das First Life, das Prime Life oder das Subprime Life, nur eben virtuell und viel langweiliger.

Nun heißt es also Web 2.0, weil Privatmenschen beginnen, das Web selbst wie bislang ihre Schrebergärten zu gestalten. Die Gartenzwerge sieht nun jedermann, der im Netz herumsurft. Menschen stellen sich dort weit gehend authentisch hinein, soweit das eben virtuell möglich ist. Der Web-2.0-Schrebergarten wirkt so, wie wenn jeder Mensch in der Tageszeitung oder in der Promigazette »Gala« kostenlos alles über sich selbst publizieren dürfte. Das Web wird unser anderes Zuhause, in dem wir zugleich überall woanders zu Besuch sein können.

Die Erfindung des Internets war eigentlich so revolutionär wie die Einführung des Ackerbaus und erfordert natürlich eine entsprechende Lernkurve. Das Web 1.0 bestand noch aus lauter Versuchen, in einem neu entdeckten Urwald Laubhütten und Lehmhäuser zu bauen. Überall Dilettanten, Proben, ungepflegte Sites, inzwischen vergessen wie Gräber oder desolate Gärten, die digital verschimmeln. Aber nun wird diese Kunstwelt neu entdeckt. Und immer, wenn wir etwas Neues im Web begreifen, nennen wir es Web plus 1. Die ersten Websites waren für den Betreiber selbst gedacht, allenfalls noch als Türschild für andere.

Ich will es so nennen: Das Web 1.0 war noch introvertiert. Goldgräber hatten sich aufgemacht und werkelten vor sich hin. Das neue Web 2.0 zeichnet sich durch das Aufkommen von Communities (Interessengruppen) aus. So ist das Web heute nicht mehr nur Siedlungsraum, sondern Eventszene, Flaniermeile oder gar zu einem Treffpunkt geworden. Das Web 2.0 ist extrovertiert! Und da ja bekanntlich drei Viertel der Menschheit extrovertiert sind (ungefähr der Teil, der anfänglich noch keine Ahnung von Computern hatte), entwickelt sich das Web erst jetzt zu einer Szenerie für die ganze Menschheit.

Das ist doch schon etwas! Aber wie geht es jetzt weiter? Längst denken Wissenschaftler über künftige Web-Wellen nach. Diese Vorausdenker sind solche, die hauptsächlich Ahnung von Computern haben, aber weniger von ihre Benutzern, den Menschen. Sie bauen vor allem intellektuell sinnvolle Dinge für die Zukunft, die dann bisweilen in überraschender Weise von den Extrovertierten oder Lustorientierten tatsächlich genutzt werden. Diese Netzintellektuellen haben beispielsweise bis heute nicht recht bemerkt, dass das Netz am Anfang eine Art Sexgipfel war. Sex taucht bis heute nicht wirklich in den Fragebögen auf, mit denen sie Normalmenschen nach ihrer alltäglichen Netznutzung befragen.

Im Grunde sind extrovertierte Menschen im Netz permanent auf Schnäppchenjagd. Sie wollen etwas billig oder völlig kostenlos erbeuten, was es ansonsten im Laden nicht so billig gibt. Nach Herzenslust klauen sie und schauen, studieren und kopieren, lauschen und tauschen. Jede Festplatte wird mit Downloads zugemüllt wie der Magen bei orgiastischer Völlerei.

Das wollen die Ordnungskräfte natürlich nicht. Die Elternartigen unter uns wollen Spaß, Sex, das Egoshooting oder neuerdings auch das Pokern am liebsten per Gesetz ganz

Seit fünf Jahren kann sich jedermann über Stellvertreter (»Avatare«) durch die virtuelle Welt von »Second Life« bewegen – mit sozialer Interaktion und Handel. Unser Autor blickt in die Zukunft solcher Parallelwelten.

MARIE-FRANCE BÉLANGER / ISTOCKPHOTO

aus dem Netz verbannen, bis jede Website einen elektronisch gesicherten Jägerzaun hat. Erst wenn der Sumpf trockengelegt ist, darf jeder hinein. Die Informatiker aber wollen für die nächste Webstufe das Wissen ordnen, ein »semantisches Web« bauen, was gut klingt und was sie daher 3.0 nennen. Sie möchten das Webchaos beenden, indem sie die Myriaden verfallener Lehmhütten des Web 1.0 kartografieren, aus ihnen nützliches Restwissen extrahieren und aufbereiten. Web 1.0 war schön wie einst der Rucksacktourismus. Aber die Web-3.0-Gurus wollen diese bunte Dschungelwelt begradigt wissen wie Hotelsilhouetten auf Mallorca.

Der webvertierte Mensch

Lässt sich heute schon vorhersagen, wie dereinst das Web 7.0 aussehen wird? Vorher müsste man wissen, wie der neue, webvertierte Mensch aussieht, den das Internet nun aus uns macht. Das würde sicherere Aussagen über die Zukunft erlauben. Ich präge hiermit eine neue Vokabel: »webvertiert« anlog zu »extro-« oder »introvertiert«. Leider gibt es diesen neuen Webmenschen, den Webvertierten, heute noch nicht. Aber immerhin sind wir umstellt von lauter Zukunftsdenkern, die ständig über Wertvolles und Wichtiges nachdenken. Womöglich bin ich selbst so einer.

So fordere ich zum Beispiel Unternehmensplanspiele in höchster Vollendung in der Art von SimCity. Dort lernt man, die verschiedenen Elemente einer Gesellschaft – wie Wasser, Polizei, Verkehr oder Gesundheit – gleichzeitig so zu jonglieren und im Gleichgewicht zu halten, dass der Shareholder-Value des Ganzen steigt. Wer das gut kann, ist theoretisch für das Topmanagement eines Konzerns bereits überqualifiziert. Denn er versteht es, alle Größen im Blick zu behalten, nicht nur Dollars. Und? Setzen sich unsere Manager vor SimCity? Genau.

Ich fordere auch Videos über wissenschaftliche Themen – das bietet sich nicht nur für Mathematik oder Physik an. Das Allermeiste, was an der Universität gelehrt wird, ließe sich damit demonstrieren. Hochwertigste Bildung 7.0, die nicht nur schneller lernen lässt, sondern die ganze Menschheit eine Stufe höher bildet, das Abitur als Minimum der Breitenbildung. Doch auf was stoße ich in den Hörsälen tatsächlich? Kreidetafeln.

Ich will damit sagen, dass die schlauesten, vernünftigsten und geldgierigsten Leute zurückzucken, wenn ungemütlich viel Arbeit droht. Im Grunde investieren diese Menschen doch nur, wenn Spaß winkt, dann verwandeln sie sich in Workaholics. Anders ausgedrückt: Das Ungemütliche im Management oder im Bildungsbereich wird nur getan, wenn es bezahlt wird. Von wem? Wieder mal vom Pleitestaat? Denken Sie kurz nach! Hier ist der Punkt, warum das Sinnvolle, Nützliche, Wahre immer zu spät kommt. Der Spaß ist schon da, weil er nicht bezahlt werden muss. Für Spaß bezahlen wir sogar selbst! Aber wenn es mühsam wird, sollen andere die Rechnung übernehmen.

Ich will es so zusammenfassen: Früher war unsere Welt traditionell orientiert und hatte die Kraft, etwas Vernünftiges hervorzubringen. Heute ist sie finanziell ausgerichtet. Deshalb wird das Vernünftige nur dann erlaubt, wenn dafür eine profitable Geschäftsidee gerechnet werden kann. Die aber gibt es nur für Spaß. Blicken Sie einmal kurz in die zum Web parallele Welt des Realen.

Dort wird etwa das Gesundheitswesen (das Vernünftige also) totgespart, während die Totsparer das Geld für Absonderliches aus dem Fenster werfen: Bodymodding (kunstvolle Körperverstümmelung), Tattoos, Neuro-Enhancement (Steigerung unserer Hirnleistung) sowie Körperimplantate aller Art. Wenn wir in die Zukunft sehen wollen, müssen wir den

Eine Stadt im Computerspiel SimCity: Wer immer schon mal regieren wollte, kann sich hier austoben – und zugleich für die Zukunft üben.

Spaß mit einem feinen Radar suchen. Hier ist ein Versuch – Kind sein! Neulich hat mir jemand bei Facebook einen Menschen geschenkt, »a human gift«, so hieß das wirklich. Sein Wert: 201 lunch Dollar (l$), das ist auf Facebook die gängige Währung. Zur Besitzergreifung musste ich die Software »Owned!« installieren. Damit werden die Bilder von Facebook wie an der Börse gehandelt. Ich war für einige Stunden danach süchtig, mich durch meist ganz abartig schlechte Fotografien zu klicken.

Jeder hat seinen Preis

Inzwischen bin auch ich schon dreimal verkauft worden und jetzt knapp über 8000 l$ wert, was gemessen an den Standards von Facebook eher erbärmlich ist – offensichtlich geht es nach Schönheit und Bildschärfe. Da jagen die Emotionen hoch. Ich habe taktisch Bilder gekauft, in die offensichtlich jemand verliebt sein musste. Denn auf Facebook läuft dauernd eine heftige Bieterschlacht. Weltweit scheinen diese »Nutzer« vor dem Monitor zu sitzen, um ihre geliebten Bilder wenige Sekunden später wieder von mir zurückzukaufen. Irgendwann habe ich jedoch aufgehört, es wurde mir einfach zu seltsam, aus der Ferne weggekauft zu werden. Haben Sie sich schon einmal gefragt, warum der junge Chef von Facebook Milliardär ist? Gehen Sie zu Owned!, die Antwort ist bitter.

Könnten wir irgendwann nicht auch die Copyrights von Artikeln handeln? Und wenn ihr Wert steigt, bekommt der Autor etwas ab. Als Autor kann ich das nur unterstützen. Aber eigentlich steckt in diesem Vorschlag schon wieder zu viel Vernunft. Wenn wir bei Owned! Bilder und implizit Menschen mit Preisschildern versehen, werden wir natürlich selbst globalisiert. Jeder hat seinen Preis. Jeder muss sich mit Heidi Klum messen und für Zahnimplantate sparen. Der Webvertierte denkt und agiert vor allem global. Er wird sich, das ist eine meiner Prognosen, im Web 7.0 in ungeahnter Weise selbst stylen und liften können. Vielleicht verschwindet er sogar in seinen Avatar und bewegt sich mit selbst gestalteter Hülle in den virtuellen Räumen herum – in der Hoffnung, dem global nivellierten Zwang, cool auszusehen, zu entkommen. Aber dann werden Unternehmen, für viel Geld natürlich, lebende Avatare anbieten, die aussehen wie Gollum im »Herr der Ringe«. Sündhaft teure Luxushüllen! E-Doping überall.

Zu Hause tragen wir hilfsweise elektronische Kleidung (e-Clothes) und werden so mit unserer jeweiligen Web-7.0-Hülle verlinkt. Wann wird das kommen? Wenn die e-Bodys billiger werden als reale Schönheitsoperationen. Wenn schon e-Clothes, dann werden sie mit zahllosen Sensoren ausgestattet sein – Körperkontakt mit einem virtuellen Stellvertreter inklusive. Wenn ein e-Body im Web 7.0 meinen persönlichen Atavar-e-Body touchiert, wird etwas ganz raffiniert Programmiertes auf mich in meinem echten, aber elektronisch ausstaffierten Körper übertragen, ganz nach meinen Vorlieben.

Der andere e-Body küsst den meinen, und ich programmiere den Vorgang wie einen Peitschenhieb. Meine e-Mama schimpft, und es fühlt sich gut an. E-Body-Chats mit Prominenten werden versteigert. Lassen Sie Ihre Fantasie schweifen. Vieles von dem, was Sie hier lesen, werden Sie, die junge Geschichte des Internets belegt es, einst wollen und dafür sogar bezahlen. Übrigens: Ich selbst sehe gerade beim Redigieren dieses Artikels, dass mein Wert durch etliche Weiterverkäufe nach Wochen inzwischen auf 9 887 319 l$ gestiegen ist – jetzt besitzt mich eine Samantha, 28.

Glauben Sie mir: Die Menschheitsgeschichte wird geradlinig weitergehen – zumindest, was den Menschen betrifft und sein Verhältnis zu Elektronik. Das Ersetzbare an sich selbst wird der Mensch nach aller Möglichkeit durch das ideal Künstliche ersetzen. Er wird sich immer weiter auf sein Eigentliches zurückziehen oder was er dafür hält: seine kleine, spaßsündige Seele. Diese wird von immer raffinierteren Möglichkeiten umgeben sein, deren Fortschritt vielleicht nicht gerade das Ziel der Menschheitsevolution ist, sicherlich aber ihr Weg. ◁

Gunter Dueck ist Cheftechnologe bei IBM und Publizist. Auf wissens-logs.de/wblogs/blog/wild-dueck-blog kommentiert er aktuelle Entwicklungen.

Palfrey,J., Gasser, U.: Generation Internet. Die Digital Natives: Wie sie leben – Was sie denken – Wie sie arbeiten. Hanser, München 2008.

Pellegrini, T., Blumauer, (Hg.): Semantic Web: Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft. Springer, Berlin 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972375.

Auf den nächsten Seiten folgt eine Sonderpublikation der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

1958

Stratosphärenflieger

»Piloten, die in extrem großen Höhen fliegen, quetschen sich die Nahrung aus Tuben in den Mund. Die Tube auf unserem Bild enthält halbverflüssigtes Hähnchen. Die Gesichtsmasken der Druckanzüge begrenzen die Nahrungsaufnahme auf solche Stoffe, die durch Kunststoffhalme aufgenommen werden können. In größeren Höhen machen die Druckunterschiede das Saugen an Strohhalmen unmöglich.« *Populäre Mechanik, Bd. 7, Heft 6, 4. Jg., Dezember 1958, S. 56*

Bei Tiefdruck gibt es Hähnchen aus der Tube.

Petroleumbeheizter Radioempfänger

»Die Fortschritte in der Halbleiterforschung haben es ermöglicht, den Peltier-Effekt technisch nutzbar zu machen, bei dem Wärme abgegeben oder aufgenommen wird, wenn ein elektrischer Strom durch die Berührungsstellen zweier verschiedener Metalle fließt. … Neuerdings berichtet W. C. Dunlap über einen petroleumbeheizten Radio-Empfänger, den er bei einem Besuch verschiedener russischer physikalischer Institute (neben dem auch dort in Entwicklung befindlichen ›Peltier-Kühlschrank‹) kennengelernt hatte. Die Heizflamme produziert 3 W bei 150 V.« *Die Umschau, Heft 23, 58. Jg., 1. Dezember 1958, S. 733*

Forschung noch kriegsbeeinträchtigt

»Westdeutschland hat die Folgen des zweiten Weltkrieges noch nicht ganz überwunden und steht noch hinter England und Schweden zurück. … In Deutschland fehlt fast eine ganze Forschergeneration: zwischen 35 und 50. Einige hohe Positionen werden von hervorragenden Wissenschaftlern eingenommen, die nun aber ›ältlich‹ sind und deren Kontakt mit den vielen ausgezeichneten jungen Männern nicht immer so eng und befruchtend ist, wie es für eine optimale Produktivität notwendig wäre. … Aber es unterliegt kaum ein Zweifel: innerhalb des nächsten Jahrzehntes wird die deutsche Wissenschaft mit der englischen auf nahezu jedem Gebiet wetteifern.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, Heft 12, 11. Jg., Dezember 1958, S. 462*

Unerhörte Luftverpestung

»Die Luftverpestung durch den Automobilverkehr ist ein Thema, das jetzt mit Recht nicht mehr zur Ruhe kommt … Die entsetzlichen, die Luft weithin erfüllenden Ausdünstungen belästigen das Publikum nicht nur in hohem Grade, sondern geben auch in sanitärer Beziehung zu den schwersten Bedenken Anlass, denn es ist erwiesen, dass in dem Auspuff der Kraftfahrzeuge Gase – das Kohlenoxyd und das Acetylen – enthalten sind, die entschieden gesundheitsschädigend wirken. Diese Tatsache ist um so bedenklicher, als das Automobil als Verkehrsmaschine einer grossen Zukunft entgegensieht.« *Patent & Industrie, Nr. 3, 20. Jg., 1. Dezember 1908, S. 34*

Träge und flinke Muskeln

»Die experimentelle Physiologie lernte zwei Arten von Muskelfasern kennen: ›träge‹ und ›flinke‹ Fasern. … So setzt sich z. B. der Schließmuskel der Kammuschel aus einem gelblichgrauen und einem scharf von ihm getrennten weißlichen Anteil zusammen. Durchschneidet man den weißen Anteil und reizt sodann den gelblichen Anteil wiederholt durch elektrische Schläge, so treten jedes Mal Zuckungen ein, die bald infolge von Ermüdung stark abnehmen. Reizt man dagegen den weißen Anteil nach Durchschneidung des gelblichen, so erweisen sich Einzelschläge als wirkungslos. Im Wechselstrom entsteht eine anhaltende Zusammenziehung.« *Die Umschau, Nr. 50, 12. Jg., 12. Dezember 1908, S. 978*

1908

Kein Schaumschläger – dieses Feuerlösch-Prinzip wird sich etablieren.

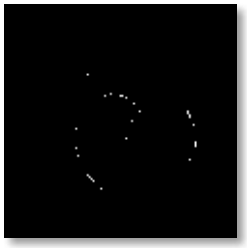
Schaumlöscher kommen in Mode

»Die bekannte Fabrik Salzkotten hat einen Spritzapparat ›Perkeo‹ in den Handel gebracht, der auf dem Prinzip der Löschung mittels Schaum beruht … Der sich ohne wesentlichen Druck entwickelnde Schaum nimmt dem Feuer immer mehr von seiner Angriffsfläche, bis zuletzt nur noch einige wenige Flämmchen aus dem Schaum herauszüngeln … Eine besonders günstige Eigenschaft des Schaumes besteht darin, daß sich gleichzeitig eine recht erhebliche Kälte entwickelt, die der Vergasung brennbarer Flüssigkeiten Einhalt zu tun geeignet ist.« *Die Umschau, Nr. 51, 12. Jg., 19. Dezember 1908, S. 1010*

BIOLOGIE

Nie waren Skelette schöner

Dieses Buch vermittelt die Evolutionstheorie auf ungewöhnliche Weise: über sorgfältig arrangierte und meisterhaft fotografierte Knochengerüste.



Dies ist kein reines Bilderbuch, sondern ein Buch für Auge und Hirn – und obendrein ein Plädoyer gegen Kreationismus und Intelligent Design.

Jean-Baptiste de Panafieu, Biologe und Redakteur beim französischen Wissenschafts-Internetportal Futura-Sciences, und Patrick Gries, ein in Paris lebender luxemburgischer Fotograf, führen uns durch das spannende Gebiet der Evolution. In sechs Kapiteln, gegliedert in meist einseitige Abschnitte, lesen wir über die Entstehung der Evolutionstheorie, Grundsätze des Körperbaus, Faktoren und Mechanismen der Artbildung. Panafieu zeigt uns Zähne, Finger, Beine, Hörner, Schnäbel und andere Körperteile einander ähnlicher Arten und demonstriert uns so, wie Speziation funktioniert.

Immer wieder spürt man die Begeisterung des Autors. Indem er neueste Erkenntnisse der Molekularbiologie und Paläontologie zitiert, macht er deutlich, dass Systematik keine altbackene Wissenschaft von gestern ist, sondern stets im Fluss und noch lange nicht zu Ende erforscht. Immer wieder greift er auf die Geschichte der Evolutionsforschung zurück und gibt so einen Eindruck davon, wie sich das Fachgebiet entwickelte.

Ein kurzer Anhang erklärt das allerwichtigste Vokabular – aber auch nur das. Allgemeine anatomische Erklärungen gibt es nicht, und was zum Beispiel ein Sesambein ist (ein kleiner Knochen, der in eine Sehne eingewachsen ist), muss man selbst herausfinden. Das Buch präsentiert Wissenssplitter – aber was für Splitter! Jede einzelne Seite macht Lust, sich weiter in dieses vielseitige Wissensgebiet zu vertiefen.

Eigentliche Augenweide des Buchs aber sind Patrick Gries' fantastische Schwarz-Weiß-Fotos von Tierskeletten aus den Sammlungen des berühmten Pariser Muséum National d'Histoire Naturelle und fünf anderen Museen und Sammlungen aus Frankreich und Monaco. Über 200 Wirbeltierskelette, die er zum Teil restaurieren musste, hat er vor schwarzem Hintergrund fotografiert. Mal sind die perfekt ausgeleuchteten Objekte Schädel in Großaufnahme, mal seitenfüllende Gesamtskelette. Am beeindruckendsten aber sind die in lebensnahen Posen arrangierten Skelette: Ein Kragenfaultier klettert auf einen Baum, ein Rotnackenwallaby hüpft vorbei, ein Magellanpinguin stürzt sich ins – unsichtbare – Wasser, ein Steinadler schlägt ein Wildkaninchen. Man möchte zu gerne wissen, wie Gries diese Zauberei bewerkstelligt hat. Jedes Grübchen, jeder Wulst, jede Rille kommt auf den kontrast- und detailreichen Bildern zum Vorschein und lädt dazu ein, genau hinzusehen. Nie waren Skelette schöner (und ungruseliger)!

Text- und gegenüberliegende Bildseite bilden stets ein zusammengehöriges Ganzes. Ein Glossar, eine Kürzesteinführung in die Systematik, ein phylogenetischer Stammbaum der Wirbeltiere, eine kleine Bibliografie und ein allgemeiner sowie ein zoologischer Index runden das Werk ab.

Ein ideales Weihnachtsgeschenk für alle biologisch und ästhetisch Interessierten.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplombiologe und arbeitet als IT Support Engineer beim Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg.

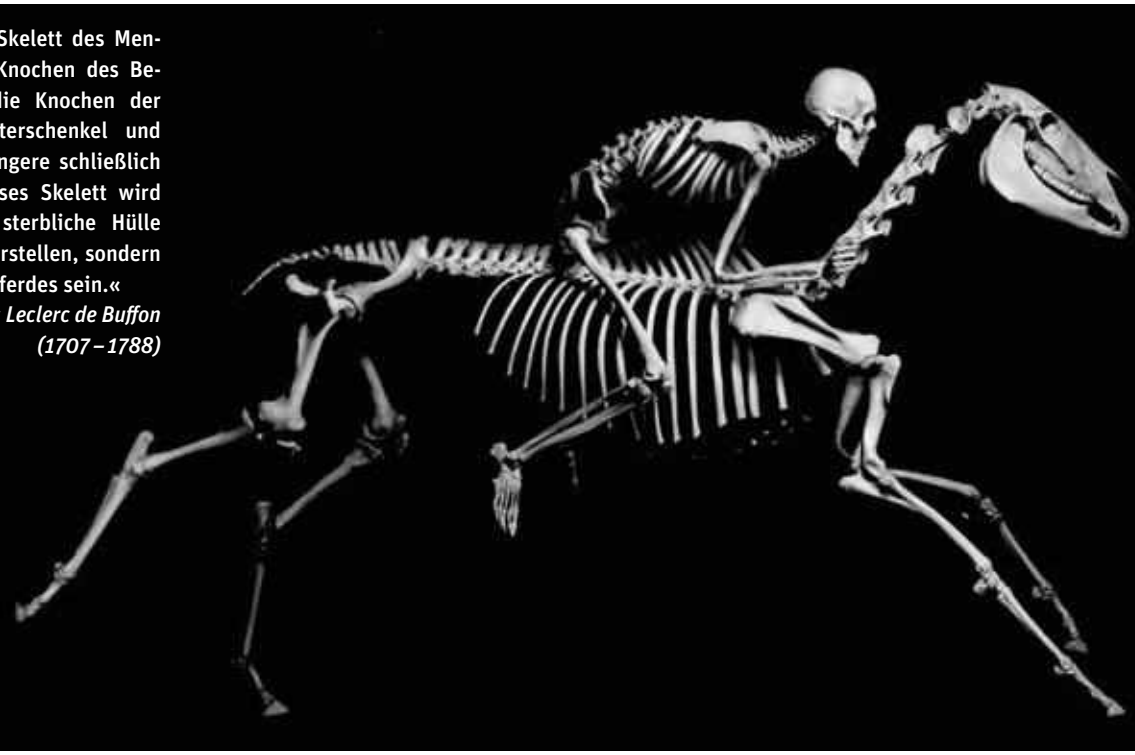
Jean-Baptiste de Panafieu (Text),
Patrick Gries (Fotos)

Evolution

Aus dem Französischen von Marianne Glaßer.
Frederking & Thaler, München 2007.
285 Seiten, € 58,–

»Man nehme das Skelett des Menschen, biege die Knochen des Beckens, verkürze die Knochen der Oberschenkel, Unterschenkel und Arme … und verlängere schließlich das Rückgrat: Dieses Skelett wird nicht länger die sterbliche Hülle eines Menschen darstellen, sondern das Skelett eines Pferdes sein.«

Georges-Louis Leclerc de Buffon (1707 – 1788)



MATHEMATIK

Perelman und die Vorgeschichte

Eine völlig abstrakte Theorie gibt Anlass zu einer Geschichte voller Leben: die Poincaré-Vermutung.

Wenn eine mathematische Großtat geschieht, hält sich das öffentliche Aufsehen gewöhnlich in Grenzen. Beim Beweis der Poincaré-Vermutung war dies anders – allerdings nicht wegen der Mathematik, sondern wegen der Person des Vollbringers. Gregori Perelman (geboren 1966), zu Hause in St. Petersburg, lehnte nicht nur alle attraktiven Angebote an bestbezahlten Professuren ab. Er verweigerte auch die Annahme der Fieldsmedaille, der dem Nobelpreis vergleichbaren Auszeichnung für junge Mathematiker, und verzichtete gar auf eine Million Dollar Preisgeld, welches ihm die Clay Institution auf Antrag für seine Leistung zweifellos ausbezahlen würde (Spektrum der Wissenschaft 10/2006, S. 108).

Man weiß nicht viel über diesen Menschen, der die Öffentlichkeit scheut und seine Arbeiten der Anonymität des Internets anvertraut. Eines jedenfalls scheint er nicht zu sein: ein politischer Überzeugungstäter. Seine radikale Verweigerung dem Establishment gegenüber ist anders motiviert als jene von Alexander Grothendieck, dem gleichfalls genialen Mathematiker, der in diesem Jahr 80 geworden ist. Während Grothendieck seine Popularität als Fieldsmedaillenträger nutzte, um gegen den Vietnamkrieg zu protestieren, und seine Stellung am elitären IHES (Institut des Hautes Études Scientifiques) aufgab, als er erkannte, dass dieses partiell von der Nato finanziert wurde, beruht Perelmans Verweigerung wohl eher auf einer tiefen Enttäuschung über die seiner Ansicht nach unzulängliche Welt der Mathematiker.

Auch das Buch von George G. Szpiro, dem Autor der Mathematikkolumne in der »Neuen Zürcher Zeitung« (Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 110), muss sich hier weit gehend auf Vermutungen beschränken. Insgesamt aber fällt es durch Wohlinformiertheit angenehm auf.

Ist jede einfach zusammenhängende geschlossene 3-Mannigfaltigkeit homöomorph zur Sphäre? Mit dieser Frage beschloss Henri Poincaré (1854 – 1912) eine Serie von Arbeiten, die sich von ersten Andeutungen im Jahr 1892 bis 1904 hinzog und ihren Autor zum Schöpfer einer neuen Disziplin machte: Was wir heute »algebraische Topologie« nennen, stieg im 20. Jahrhundert zu einer Leitdisziplin der reinen Mathematik auf.

In den 1960er Jahren fand die Topologie im Rahmen der »Neuen Mathematik« breite Beachtung. Viele Autoren machten sich auf, sie dem Laien und auch dem Grundschüler in Form der »Gummituchmathematik« zu erklären. Von dieser Metapher macht auch Szpiro ausgiebig Gebrauch, denn sein Buch möchte dem Leser ohne Formeln – bis auf zwei Ausnahmen – und ohne Abbildungen hochabstrakte Mathematik nahebringen. In der Tat geben seine Gummibänder und Fallschirme dem Leser einen gewissen Eindruck von der Materie – durchaus im Sinn Poincarés, der sich schon selbst daran versuchte, die Topologie dem Laien zu erklären, weil er ihr einen erkenntnistheoretischen Wert zuerkannte.

Merkwürdigerweise ist durchaus zweifelhaft, ob Poincaré die poincarésche Vermutung wirklich vermutet hat. Im Gegensatz zu dem Stil heutiger mathematischer Abhandlungen schrieb er seine Erkenntnisse ungefähr so nieder, wie sie ihm zufielen; und das taten sie reichlich. Seine Texte ähneln Selbstgesprächen, und die – häufigen – Fragen markieren nichts weiter als Punkte, an denen weitergedacht werden muss. Ob Poincaré zu der Überzeugung gekommen war, die Antwort auf seine Frage sei »Ja«, ist unklar.

Szpiro zeichnet das Bild, das man von dem Mathematiker, Physiker und Philosophen Poincaré kennt – ein weltabgewandter, aber netter Mensch, der sich wenig in die Angelegenheiten seiner Zeit einmischte. Dieser Mythos geht nicht zuletzt auf die Lebensbeschreibung seiner ihn verehrenden Schwester Aline zurück und bedarf gewisser Relativierungen. Szpiro hebt hervor – und das ist verdienstvoll –, dass Poincaré durch sein Ingenieurstudium an der Pariser École Polytechnique und an der École des Mines geprägt war und von dort unter anderem ein tiefes Interesse für Fragen des Bergbaus mitgenommen hat. Natürlich darf auch der Cousin nicht fehlen, Raymond Poincaré, der spätere Präsident der Französischen Republik.

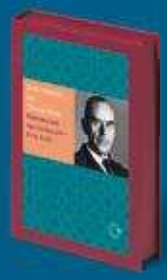
Vorteilsangebot für Leser von Spektrum der Wissenschaft

Bis 31. 12. 2008: 20 % auf Argon-Hörbücher

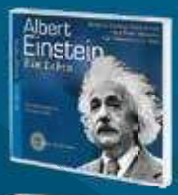
Vielleicht suchen Sie gerade …

… den neuen Roman von Carlos Ruiz Zafón als Hörgenuss für nasskalte Wintermonate?

… eine opulente Klassikeredition als schönes Weihnachtsgeschenk?



… ein aufwändig produziertes kompetentes Sachhörbuch für unterwegs?



… intelligente Hörbücher für Kinder?

argon hörbuch

Oder vielleicht lieben Sie einfach Hörbücher und kennen ohnehin das facettenreiche hochwertige Angebot des Argon Verlags.

Das ist interessant? Dann besuchen Sie uns im Internet unter www.argon-premium.de/spektrum

Die einschlägige Literatur wird etwas stiefmütterlich behandelt; so verschweigt Szpiro Peter Galisons Buch »Poincarés Karten, Einsteins Uhren« (Spektrum der Wissenschaft 6/2004, S. 98), das Poincarés Studienzeit ausgiebig und profund beschreibt, und Moritz Epples Standardwerk »Die Entstehung der Knotentheorie«. Sehr umfassend ist dagegen die Bibliografie zu den mathematischen Originalarbeiten zur Poincaré-Vermutung, insbesondere zu den gescheiterten Beweisversuchen.

Viel Beachtung schenkt der Autor der spektakulären Affäre (1889/90) um den Preis König Oscars II. von Norwegen, der Poincaré für einen fehlerhaften Beitrag zum Dreikörperproblem zugesprochen wurde (Spektrum der Wissenschaft 1/1997, S. 24). In einer verdeckten Aktion wurden die bereits ausgelieferten Exemplare der fraglichen Abhandlung zurückgeholt und durch eine korrigierte Version ersetzt – Stoff für einen Krimi, wenn auch nicht allzu relevant für den Rest des Buchs.

Es folgt ein Überblick zur Geschichte der »Analysis situs«, so die frühere Bezeichnung der Topologie, und ihrer wichtigsten Ideen. Indem der Autor geschickt Sachliches wie das Möbius-Band mit Persönlichem, in diesem Fall Leben und Werk von August Ferdinand Möbius (1790 – 1868), verbindet, werden seine Ausführungen interessant und abwechslungsreich. Immer wieder scheint die menschliche Dimension des Unternehmens Mathematik durch.

Viel Raum widmet Szpiro den Beweisversuchen für die Poincaré-Vermutung, beginnend mit John H. C. Whitehead (1904 – 1960) in den 1930er Jahren und endend mit Valentin Poénaru und Richard Hamilton in den 1990ern. Auch hier erfährt man vieles, zum Teil wenig Bekanntes über die Protagonisten dieser Geschichte. Einige Einzelheiten fehlen: Herbert Seifert (1907 – 1996) konnte 1932 die Poincaré-Vermutung für eine eingeschränkte Klasse von Fällen bestätigen und lieferte damit das erste positive Resultat in diesem Zusammenhang. Der mutige Kollege, der Max Dehn (1878 – 1952) und seine Frau vor der Verfolgung durch das Nazi-Regime versteckte (S. 119), hätte gewiss eine namentliche Erwähnung verdient: Es war der spätere Frankfurter Astronomiehistoriker Willy Hartner (1905 – 1981).

Schließlich kommt der Autor ausführlich auf den zweiten Helden Grigori Perelman zu sprechen; dabei unternimmt er es, dessen Ideen zumindest in Ansätzen dem Leser verständlich zu machen – mit Erfolg. Insgesamt dominiert natürlich die Story des Menschen Perelman, der als Mathematiker in den USA Furore machte, um dann mit seinem Ersparten in Russland unterzutauchen. Deutlich wird auch, wie schwierig es war, seine Leistung zu prüfen. Nicht noch einmal sollte, wie rund 20 Jahre zuvor, ein falscher Beweis irrtümlich in den Mittelpunkt des Interesses geraten; um das zu vermeiden, hat die mathematische Welt spezielle Mechanismen entwickelt. Dies liefert ein farbiges und eindrucksvolles Bild von der Tätigkeit des Mathematikers, wenn auch mehr von den bunten Feiertagen denn vom grauen Alltag dieser Berufsgruppe. Die Highlights tauchen den Rest ein wenig ins Dunkle, aber das lässt sich bei dem Thema nicht vermeiden.

Die Übersetzung lässt gelegentlich zu wünschen übrig, was ein sachkundiges Lektorat sicher leicht verhindert hätte. Schade finde ich, dass es in diesem Buch keine Abbildungen gibt.

Insgesamt ist es Szpiro gelungen, schwierige Mathematik und ihre Geschichte allgemein verständlich in sehr lesenswerter und spannender Form darzustellen.

Klaus Volkert

Der Rezensent ist Professor für Didaktik der Mathematik an der Universität zu Köln.

George G. Szpiro
Das Poincaré-Abenteuer
Ein mathematisches Welträtsel wird gelöst
Aus dem Englischen von Thomas Bertram.
Piper, München 2008. 347 Seiten, € 19,90

PSYCHOLOGIE

Die Bedingungen des Bösen

Im Rückblick stellt sich heraus, dass ein harmlos scheinendes psychologisches Experiment in erschreckender Weise die Verhältnisse im irakischen Skandalgefängnis Abu Ghraib vorweggenommen hat.

Es ist erschreckend einfach, ganz normale Menschen zu den übelsten Taten zu veranlassen. Man muss sie nicht dazu zwingen, es ihnen nicht einmal nahelegen. Sie kommen von selbst darauf und entwickeln sogar eine beängstigende Kreativität – wenn man die entsprechenden Umstände schafft.

Philip Zimbardo hat das 1971 als junger Psychologieprofessor in Stanford (Kalifornien) im Rahmen eines wissenschaftlichen Experiments getan. Das berühmt gewordene »Stanford Prison Experiment« (SPE) geriet so dramatisch außer Kontrolle, dass es vorzeitig abgebrochen werden musste. Der deutsche Film »Das Experiment« von 2001 (Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 104) greift diese Geschichte auf (mit einigen Freiheiten, die Zimbardo ihm mächtig übelnimmt).

Vor dem eigentlichen Experiment hat der Autor seine Versuchspersonen – Studienanfänger »aus gutem Hause« – sorgfältig auf irgendwelche Neigungen zu Gewalttätigkeit und Aggressivität abgeklopft. Der einen Hälfte von ihnen wird die Rolle des Gefängniswärters zugewiesen, mit Uniform, Schlagstock, dunkler Brille und Schlüsselgewalt über eigens dafür hergerichtete Räume. Die anderen sind die »Gefangenen«: Eingekleidet in nichts als einen einfachen weißen Kittel und zu dritt in Zellen gesperrt, dürfen sie nicht ihre eigenen Namen, sondern nur die auf die Kittel aufgenähten Nummern verwenden und haben den Anweisungen der Wärter Folge zu leisten.

Von Anfang an entwickeln die Wärter eine Neigung, ihre Gefangenen herabzusetzen und zu demütigen; sie stellen einen Katalog sinnloser Regeln auf, finden ihre Freude daran, die Gefangenen nach ihrer Pfeife tanzen zu lassen und durch Nahrungs- und Schlafentzug bis zum körperlichen Ausnahmezustand zu bringen. Bereits nach fünf Tagen zwingen sie ihre Opfer zu entwürdigenden sexuellen Spielchen: »Seht ihr das Loch im Boden? Jetzt macht ihr 25 Liegestütze und fickt das Loch! Verstanden?«

Die Gefangenen dagegen nehmen das Rollenspiel zunehmend für bare Münze, auch weil Zimbardo mit einer inszenierten Verhaftung durch echte Polizisten, dem Besuch eines echten Gefängnisgeistlichen und vor allem seinem eigenen Rollenverhalten als Gefängnisdirektor die Situation echter erscheinen lässt, als sie ist. Keiner der Gefangenen macht von der zugesicherten Möglichkeit, vorzeitig auszusteigen, Gebrauch.

Specialist Sabrina Harman beugt sich mit einer Daumen-hoch-Geste über die in Eis gepackte Leiche des an der Folter gestorbenen Irakers Manadel al-Jamadi.

In der ausführlichen Analyse des Experiments scheut sich Zimbardo entgegen den Bräuchen seiner Zunft nicht, die Begriffe »gut« und »böse« ausgiebig zu verwenden. Zweifellos waren die Taten der Wärter böse; waren es aber auch die Wärter selbst?

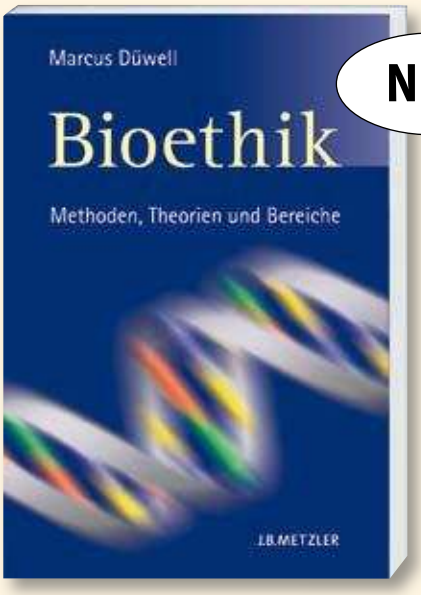
Zimbardo enthält sich sorgfältig jeder Diskussion über freien Willen und Verantwortung. Selbstverständlich bleibe jeder Mensch für seine Taten verantwortlich, auch wenn er sie in einer Ausnahmesituation begeht. Gleichwohl zerlegt Zimbardo die Faktoren, die das Handeln des Menschen beeinflussen, in »dispositionelle« (in der Persönlichkeit des Handelnden liegende) und »situative«. Für den situativen Anteil böser Taten trage derjenige die Schuld, der die Situation herbeigeführt hat. Und das war im SPE eindeutig er selbst, was ihm Anlass zu längeren selbstkritischen Betrachtungen gibt.

In einem groß angelegten theoretischen Teil führt er zahlreiche Situationen auf, die dem SPE in diesem oder jenem Aspekt vergleichbar sind. Berühmt geworden sind die Experimente seines Fachkollegen und Schulfreunds Stanley Milgram, dessen Versuchspersonen bereit waren, ihren Mitprobanden tödliche Elektroschocks zu verabreichen, weil der Versuchsleiter das im Namen der Wissenschaft von ihnen verlangte. Einem Geschichtslehrer an einer High School in Palo Alto (Kalifornien) gelingt es, binnen weniger Tage seine Schüler zu kleinen Nazis umzuerziehen – eine drastische Form von *learning by doing*. Milgram geht so weit zu behaupten, dass man in jeder mittelgroßen US-amerikanischen Stadt ausreichend Bewachungspersonal für ein KZ finden würde. Die Gräueltaten der Nazis selbst, der Massenselbstmord der Sektenmitglieder des Jim Jones in Guayana 1978, der Völkermord an den Tutsi in Ruanda, Selbstmordattentate aus neuerer Zeit – es gibt mehr als genug Anlass zum Schaudern darüber, zu welch fürchterlichen Taten Menschen durch entsprechende Situationen veranlasst werden.

Dazu kommt die Warnung Zimbardos an den Leser: Jeder glaubt, ihm selbst könnte

Anzeige

Was ist ethisch vertretbar?



Neu

Heiß umstritten: Gentechnologie, Euthanasie, Stammzell- und Embryonenforschung. Vor dem Hintergrund der aktuellen Ethik-Debatten stellt der Autor die Diskussionen um die Grenzen menschlichen Handelns, um Leben, Natur und den wissenschaftlichen Fortschritt auf ein philosophisches Fundament. Er erläutert Geschichte, Methoden und Begriffe der Bioethik und geht der Frage nach: Wie ist die veränderte Welt moralphilosophisch zu bewerten? Systematische Einführung zum Thema wissenschaftlicher Fortschritt und Moral.

Düwell
Bioethik
2008. 285 S. Kart. € 24,95
ISBN 978-3-476-01895-3

Bequem bestellen:
www.metzlerverlag.de
info@metzlerverlag.de

1682 J.B.METZLER

das nicht passieren. Im Ernstfall jedoch hält nur eine sehr kleine Minderheit dem Druck der Situation stand. Also hält sich der durchschnittliche Mensch für weit heldenhafter als den durchschnittlichen Menschen. Anders ausgedrückt: Wir alle überschätzen unsere Heldenqualitäten und unterschätzen die Macht der Situation – und sind ihr damit umso hilfloser ausgeliefert.

Was sind die Elemente einer Situation, die zu bösen Taten verführt? Zimbardo zählt auf: Der Täter fühlt sich und seinesgleichen von außen bedroht; eine übergeordnete Autorität gibt seinem Verhalten Legitimität oder setzt ihm zumindest nichts entgegen; Gruppendruck erzeugt Konformität; er selbst ist nicht mit Namen oder Gesicht identifizierbar (die dunklen Brillen!); seinen Opfern fehlen individuelle Merkmale (sie sind auf Nummern reduziert); die eigenen Lebensumstände sind unangenehm.

Zimbardos Stanforder Kollege Albert Bandura baut einige dieser Elemente zu einer Theorie »moralischer Abkopplung« aus: Wenn die Situation es dem Menschen ermöglicht und eindrücklich nahelegt, dann trennt er seine moralischen Überzeugungen von seinem tatsächlichen Verhalten, so wie man im Auto mit dem Kupplungspedal den Motor vom Getriebe abkoppelt. Wenn die Ausnahmesituation vorbei ist, kuppelt man halt wieder ein und fährt weiter. Eigentlich erklärt diese merkwürdige mechanische Metapher nichts; aber sie lässt es einleuchtend erscheinen, dass etliche Übeltäter nach dem Ende des Kriegs oder der Diktatur ohne erkennbare Mühe wieder zu ganz normalen, integren Mitmenschen wurden.

Der Autor hatte einen sehr aktuellen Anlass, nach mehr als 30 Jahren endlich eine detaillierte Beschreibung des Experiments von 1971 vorzulegen: In den Misshandlungen Gefangener durch amerikanische Soldaten im irakischen Gefängnis Abu Ghraib erkennt er das Verhalten seiner damaligen Gefängiswärter wieder – aber diesmal ist es bitterer Ernst. Nur schwarz-weiß und körnig mutet uns Zimbardo die Fotos von hübschen jungen Soldatinnen zu, die neben misshandelten oder soeben umgebrachten Gefangenen in Siegerpose strahlen (Bild S. 109). Zimbardo führt als Zeuge der Verteidigung für einen der Täter die Macht der Situation als mildernden Umstand an – vergeblich, das Urteil fällt überaus hart aus.

Der letzte Teil des Buchs besteht, im Einklang mit seiner Analyse, aus einer Anklage gegen diejenigen, welche die Situation herbeigeführt haben, von den verantwortlichen Generälen die Hierarchie aufwärts bis zu Veteidigungsminister Donald Rumsfeld und Präsident George W. Bush. Hier wird die Lektüre ermüdend, nicht nur weil Zimbardo sich die Mühe macht, wie in einem echten Gerichtsverfahren alle seine Behauptungen umständlich mit Beweisen zu untermauern. Anders als 2005, als die Originalausgabe des Buchs erschien, ist die Ära Bush inzwischen Geschichte, und der beendete Skandal von Abu Ghraib verblasst neben dem fortdauernden Skandal von Guantánamo. Von den dortigen Vernehmern haben die Folterer von Abu Ghraib ihr Handwerk gelernt. Immerhin ist eine Nachricht noch interessant für die Gegenwart: Der Mann, der im US-Senat am hartnäckigsten die zu Tage getretenen Praktiken hinterfragt hat, war ausgerechnet John McCain.

Am Ende bemüht sich Zimbardo, dem Buch mit einer – etwas albern systematisierten – Lobpreisung von Helden, die der Macht der Situation widerstanden haben, eine versöhnliche Wendung zu geben. Es will nicht recht gelingen; zu eindrucksvoll und bedrückend ist der Hauptteil des Werks.

Die eigentliche Heldin passt sowieso nicht richtig ins Schema. Es handelt sich um Zimbardos damalige Kollegin und Freundin Christina Maslach. Erst nach einigen Tagen, als das SPE bereits absurde Züge angenommen hatte, stieß sie dazu, machte ihrem Entsetzen darüber, wie Zimbardo, selbst Teil des Systems geworden, sich verändert hatte, mit einem Aufschrei Luft und brachte ihn damit wieder zur Besinnung. Seit 1972 ist sie mit ihm verheiratet.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Philip Zimbardo
Der Luzifer-Effekt
Die Macht der Umstände und die Psychologie des Bösen

Aus dem Englischen von Karsten Petersen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2008. 504 Seiten, € 39,95

KOGNITION

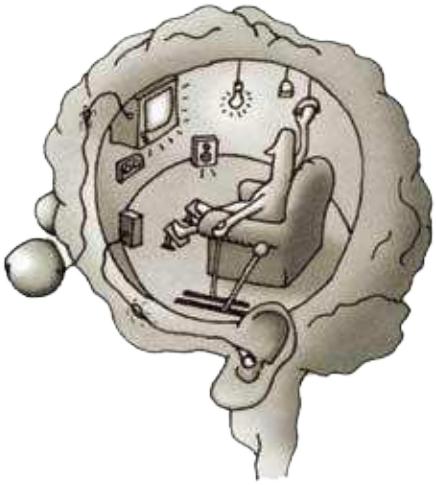
Plaudereien unter Kollegen

Susan Blackmores in Interviewform geschriebenes Buch liefert spannende Einblicke in das Grenzland zwischen Neurowissenschaft und Bewusstseinsphilosophie.

Die Psychologin Susan Blackmore ist bekannt geworden mit der wissenschaftlichen Erforschung »paranormaler« Phänomene wie Nahtoderfahrungen. Ihr Buch »Die Macht der Meme« über die umstrittene Mem-Theorie gilt inzwischen als Klassiker. Nun wagt sich die Wissenschaftlerin und Publizistin an eines der schwierigsten Themen überhaupt: das Bewusstsein. Jeder von uns erlebt sich selbst als bewusst; aber niemand kann bisher diese Eigenschaft unseres Gehirns wissenschaftlich sauber definieren.

Jahrelang hat die Autorin, die inzwischen selbst auf diesem Gebiet forscht, am Rand von Kongressen Interviews geführt. Ursprünglich als Radiosendungen geplant, sind diese nun gesammelt als Buch erschienen. Wie selbstverständlich kommen in ihrem Werk sowohl Philosophen als auch Neurowissenschaftler zu Wort. Das Buch reiht sich damit ein in einen Trend der letzten Jahre, das zaghafte Brückenbauen zwischen Natur- und Geisteswissenschaften. Die Subjektivität wird Objekt wissenschaftlicher Forschung.

Blackmore spricht mit den Prominenten des Fachs wie Daniel Dennett, Thomas Metzinger, Vilayanur Ramachandran, David Chalmers, John Searle und Francis Crick ebenso wie zum Beispiel mit dem Querdenker Stuart Hameroff (»Bewusstsein ist Quantenkohärenz in den Mikrotubuli«). Es geht um die scheinbar unüberbrückbare Kluft zwischen Außen- und Innenperspektive. Wie entstehen aus dem Feuern eines Knäuels von Neuronen Erfahrungen und Gefühle? Ergibt sich Bewusstsein zwangsläufig aus bestimmten physiologischen Prozessen? Oder könnte es einen »philosophischen Zombie« geben, ein Wesen, das für den externen Beobachter in allen Aspekten einem Menschen gleicht, aber seine Welt nicht bewusst erlebt? Auch das damit eng verknüpfte Problem der Willensfreiheit ist wiederkehrendes Gesprächsthema. Manche Theorien werfen das menschliche



Die meisten Menschen stellen sich unter »Bewusstsein« einen Ort oder Prozess im Gehirn vor, an dem alles zusammenläuft und dem »inneren Publikum«, das nur aus einem einzigen Zuschauer besteht, vorgeführt wird. Daniel Dennett nennt diese falsche Vorstellung den »cartesischen Materialismus«.

Selbstverständnis radikal über den Haufen. Die Idee, das »Selbst« könnte eine Illusion sein, kratzt doch gehörig an allen gängigen Vorstellungen über das Bewusstsein.

Der Leser lernt vor allem eines: In fast nichts sind sich die Denker einig. Endgültige Antworten gibt es nicht und eine Erklärung des Phänomens Bewusstsein schon gar nicht. Durch die Vielfalt der präsentierten Meinungen legt Blackmore dem Leser nie eine bestimmte Position nahe, sondern bietet einen Überblick über den Stand der Forschung.

In Susan Blackmores Interviews tritt nicht einfach eine Journalistin einem Experten gegenüber. Es sind Gespräche auf Augenhöhe, durch die der Leser ebenso viel über die Autorin erfährt wie über die Interviewten. Blackmore ist mit dem Stoff bestens vertraut, der Leser hat den Eindruck, Plaudereien unter Kollegen zu lauschen. Gegen den Willen einiger ihrer Gesprächspartner hat sie die Gespräche weit gehend im ursprünglichen Zustand belassen. Das Buch gewinnt dadurch enorm. Abschreckender Fachjargon weicht einer erfrischenden Klarheit. So gelingt es Blackmore, ihr ungeheuer abstraktes Thema mit einer beeindruckenden Lockerheit rüberzubringen. Ihre Gesprächspartner erscheinen nicht nur als Überbringer von Informationen, sondern als Charaktere. Der Leser kann sich von der Begeisterung der Forscher für ihre Arbeit anstecken lassen.

Sehr gelungen sind auch viele der karikaturartigen Illustrationen. Die Darstellung von Dennetts »cartesianischem Theater« (Bild links) bringt das Konzept besser auf den Punkt als jeder Text. Leider ist das Buch nur sehr spärlich mit den Zeichnungen ausgestattet und manche der Texte nicht mehr die jüngsten: Die Interviews reichen teilweise bis ins Jahr 2000 zurück.

Insgesamt aber hat Blackmore aus einem unglaublich schwierigen Thema ein locker und spannend zu lesendes Buch gemacht. Mehr kann man von gutem Wissenschaftsjournalismus nicht verlangen.

Malte Jessl

Der Rezensent ist Diplombiologe und freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

Susan Blackmore
Gespräche über Bewußtsein
Aus dem Englischen von Frank Born.
Suhrkamp, Frankfurt am Main 2007.
380 Seiten, € 26,80

Anzeige

Astronomie geht neue Wege …
Seien Sie live dabei!

Redshift 7 premium

Die Planetarium Software

Neu in Redshift 7 premium:

- ✔ Neues Programmdesign und hervorragende Programm-Performance
- ✔ Realistisches 3D-Modell unserer Galaxie mit beeindruckendem 3D-Flug
- ✔ Jetzt mit über 100 Millionen Sternen und neuen Panoramen für Erde, Mond und Mars
- ✔ Neue Himmelskörper: Exo- und Zwergplaneten
- ✔ Zeitplaner für Himmelsbeobachtungen
- ✔ Online-Zugriff auf die Sternenkataloge USNO-B1.0, SIMBAD sowie SOHO
- ✔ Direkte Koppelung an www.redshift-live.com zum Laden und Veröffentlichen von Himmelsführungen und Redshift-Einstellungen

Inhalt: DVD-ROM für WIN
ISBN: 978-3-8032-1776-9
UVP: € 79,90/sFr 135,–

Redshift NEU!
www.redshift-live.com

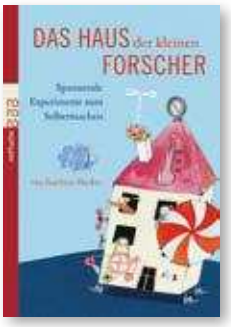
- ✔ Die Astronomie-Community im Internet ✔ RedShift 7 zum Download
- ✔ Kosmos Himmelsjahr online ✔ In Zusammenarbeit mit renommierten Astronomie-Experten
- ✔ Redshift 7-Inhalte von anderen Nutzern und Profis ✔ Mit Diskussions- und Themenforen

Steigen Sie jetzt ein auf www.redshift-live.com und holen Sie sich die kostenlose Redshift 7 Basis-Software!

Jetzt im Handel oder direkt bestellen!

USM
United Soft Media Verlag GmbH
Thomas-Wimmer-Ring 11
D-80539 München

Telefon: 089/24 23 48 03 •Fax: 089/29 08 81 60
E-Mail: bestellung@usm.de • Online-Shop: www.usm.de



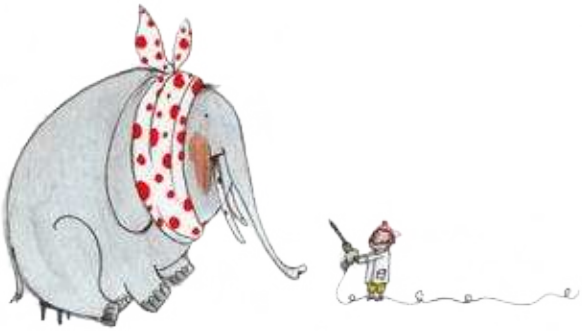
KINDERBUCH

Willkommen in der Wissenschaft, Kinder

Joachim Hecker hat ein Lach-, Sach- und Experimentierbuch geschrieben, das bereits Vorschulkinder zu kleinen Forschern macht.

»Denk dir eine Welt mit Wiesen, Bergen, Wäldern und Seen, bewohnt von kühnen Rittern, Feuer speienden Drachen, Furcht einflößenden Ungeheuern und Außerirdischen, die aus den Tiefen des Alls zu Besuch kommen.« In dieser abenteuerlichen Kulisse lässt Joachim Hecker die kleinen Forscher Karla, Luisa und Vincent wohnen – ganz ohne nervige Erwachsene. Nur eine Katze namens Berleburg leistet ihnen Gesellschaft.

Nachts, wenn die ganze Wohngemeinschaft tief und fest schläft, wandert das »Haus der kleinen Forscher« – es hat nämlich Füße – an einen anderen Ort der wundersamen Welt und stellt die Kinder immer wieder vor neue Herausforderungen: Ein Elefant hat Zahnschmerzen, ein glühend roter Drache Husten, ein Seeungeheuer ist in Not geraten … Diese und 35 weitere Stationen nutzt der Autor, der Elektrotechnik studiert hat und inzwischen als Wissenschaftsjournalist arbeitet, um naturwissenschaftliche Experimente einzuleiten. Mit ihrer Hilfe gelingt es den kleinen Forschern, alle Probleme letztlich zu lösen.



An dieser Stelle geht die fantastische Geschichte in eine handfeste Experimentieranleitung samt Materialliste über. Man braucht Allerweltsdinge wie Eierschalen, Luftballons und Teebeutel, und die kleinen Leser sind herzlich eingeladen, ordentlich mitzumischen. Sind Schere oder Feuer im Spiel, wird ausdrücklich nach einem Erwachsenen verlangt. Etwa wenn ein selbst gebastelter Streifen aus Aluminiumfolie und Papier über eine Flamme gehalten werden soll.

Auf jeder Seite zeigen bunte Illustrationen den Versuchsaufbau oder kleine Fantasien zum Thema. Nach dem praktischen Teil erklärt der Autor, was warum passiert und wo das Erlernte im Alltag oder in der Natur zu finden ist. So stellt Hecker mit dem Aluminium-Papier-Streifen das Prinzip von Bimetallen vor und berichtet von deren Einsatz in Thermometern oder Thermostaten.

So simpel die Experimente wirken mögen, sie veranschaulichen doch durchaus nichttriviale Phänomene aus Biologie, Chemie, Technik und vor allem Physik auf eindringliche Weise. Eine Spielkarte so am Fahrrad des Freundes montiert, dass die Speichen sie zum Surren bringen, demonstriert den Dopplereffekt, einige Trinkhalme und Murmeln die Impulserhaltung und eine Fliege im Kühlschrank den Unterschied zwischen Warm- und Kaltblüter.

Für besonders Wissbegierige liefert Hecker zu jedem Versuch Hintergrundinformationen. Dabei geht es – manchmal weit über die Köpfe der Zielgruppe hinweg – ohne weitere Erläuterung um den Kalten Krieg, um Genetik oder um die Geschwindigkeit, die ein Satellit braucht, um dem Schwerefeld der Erde zu entkommen – immerhin 28 500 Kilometer pro Stunde. Wenngleich so anspruchsvolle Themen eher die Ausnahme sind, schwankt der Schwierigkeitsgrad in dieser Rubrik stark.

Zu guter Letzt gibt Hecker noch Anregungen, wie man den jeweiligen Versuch in leicht abgewandelter Form durchführen kann. Wer alle Experimente gemacht hat, kann sich den Vordruck für ein richtiges Forscherdiplom aus dem Internet herunterladen (www.rowohlt.de/forscherdiplom), dazu etliche weitere Experimentieranleitungen.

Das Buch eignet sich zum Vorlesen und zum Nachmachen ab dem Kindergartenalter. Dabei müssen sich die »Assistenten« auf Kollateralschäden wie eine mit Maisstärkebrei verklebte Laborküche, Götterspeise im Gefrierschrank oder ein geplündertes Tulpenbeet gefasst machen. Aber das mag ein angemessener Preis für die alles andere als langweilige und trockene Physik sein. Und wie der Autor motivierend anmerkt: »Im Namen der Wissenschaft darf ruhig auch etwas geferkelt werden!«

Erschienen ist das Buch im Zusammenhang mit der Initiative »Haus der kleinen Forscher«, die von der Helmholtz-Gemeinschaft, McKinsey & Company, Siemens und der Dietmar Hopp Stiftung getragen wird. Sie hat sich zum Ziel gesetzt, Naturwissenschaft und Technik bereits in Kindertagesstätten sowie Kindergärten einzubeziehen und die frühkindliche Bildung zu fördern.

Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt den bundesweiten Ausbau des Projekts, nennt allerdings die Stärkung der frühkindlichen Bildung im selben Atemzug mit der langfristigen Nachwuchssicherung in den Natur- und Ingenieurwissenschaften. Das ist dann doch etwas zu weit vorausgedacht. Solange aber die Kinder stets die treibende Kraft bei der Sache sind, ist es zumindest einen Versuch wert.

Maike Pollmann

Die Rezensentin ist Diplomphysikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Joachim Hecker
Das Haus der kleinen Forscher
Spannende Experimente zum Selbermachen
Mit Illustrationen von Sybille Hein
Rowohlt, Berlin 2007. 206 Seiten, € 19,90, Taschenbuchausgabe € 9,95

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

VORSCHAU

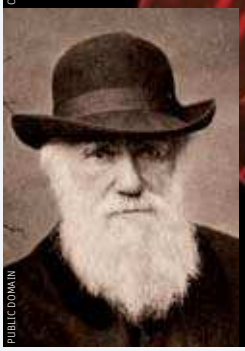
Heft Januar 2009
ab 23. Dezember im Handel

Evolution: Gruppe kontra Individuum

In der Evolution konkurrieren nicht nur die Individuen. Die hier gezeigten Staatsquallen sowie Insektenstaaten und menschliche Gemeinschaften beweisen: Es gibt Anpassungen, die statt dem Einzelnen dem Gruppenwohl dienen

CASEY DUNN, BROWN UNIVERSITY

Darwin-Jahr 2009
Streitfall Selektion



PUBLIC DOMAIN

WEITERE THEMEN IM JANUAR

Ist der Kosmos ein Donut?

Vieles spricht für ein unendliches Universum. Zu den Beobachtungsdaten passt aber auch ein endlicher Kosmos in Form eines Torus

Ökostädte der Zukunft

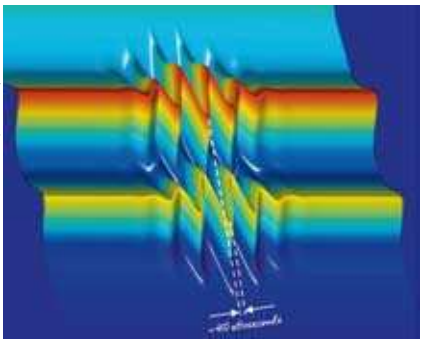
Weltweit entwerfen Städteplaner Visionen hochtechnisierter und doch naturnaher Metropolen, die Umwelt und Klima kaum belasten

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

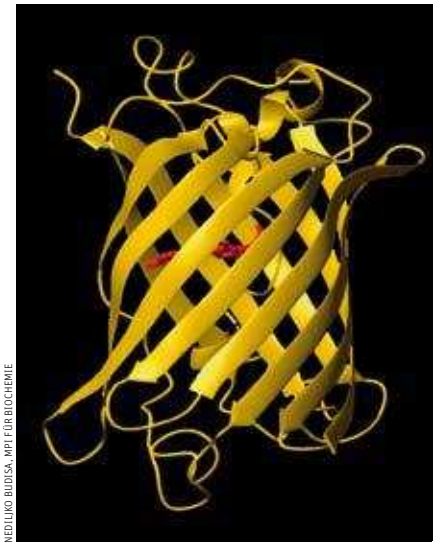
www.spektrum.com/newsletter



MIT FRDL. GEN. VON REINHARD KIENBERGER, MPI FÜR QUANTENOPTIK

Elektronenjagd mit Lasern

Attosekundenphysiker dringen in den Mikrokosmos ein: Mittels ultrakurzer Laserpulse verfolgen sie die Bewegung einzelner Elektronen



NEDIJLKO BUDISA, MPI FÜR BIOCHEMIE

Den Kode des Lebens erweitern

Eine Art Genkode-Evolution im Labor soll der Biotechnologie eine neue Dimension eröffnen. Mit künstlichen Bausteinen lassen sich maßgeschneiderte Proteine und Biomaterialien erzeugen